

УДК 621.313.1

DOI 10.46960/2658-6754_2022_3_32

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА УСКОРЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ

В.А. Федорова

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
e-mail: win.victoria08@mail.ru

В.Ф. Кириченко

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
e-mail: viktorkirichenko-v@mail.ru

Г.В. Глазырин

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
e-mail: glazyring@gmail.com

Синхронизация (операция по включению синхронных генераторов на параллельную работу с энергосистемой) осуществляется двумя традиционными методами: вручную или автоматически. Она может сопровождаться последствиями, зависящими от выбранного метода синхронизации и человеческого фактора. В рамках исследования разработано автоматическое устройство синхронизации, представляющее собой одну из подсистем комплекса КПА-М с возможностью включения генераторов различными методами: точной и ускоренной синхронизации. Метод ускоренной синхронизации основан на расширении диапазона допустимых значений в момент включения, что актуально при вводе оборудования в аварийных и послеаварийных режимах работы сети. Разработаны алгоритмы работы всех структурных блоков устройства синхронизации. Для блока расчета контролируемых величин разработан комплексный алгоритм, при котором отклонение замера частоты на входе устройства на 5 Гц обуславливает погрешность расчета угла δ в 0,6 %, что позволяет определять параметры с требуемой точностью. Эксперименты, проведенные на физической модели, подтверждают, что средняя длительность синхронизации ускоренным методом в два раза ниже, чем при точной синхронизации.

Ключевые слова: автоматические синхронизаторы, метод ускоренной синхронизации, переходный процесс, синхронизация, синхронный генератор.

Для цитирования: Федорова В.А., Кириченко В.Ф., Глазырин Г.В. Разработка автоматического устройства ускоренной синхронизации генераторов // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 3. С. 32-48.

DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_32

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC DEVICE FOR GENERATOR ACCELERATED SYNCHRONIZATION

V.A. Fyodorova

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia
e-mail: win.victoria08@mail.ru

V.F. Kirichenko

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia
e-mail: viktorkirichenko-v@mail.ru

G.V. Glazyrin

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia
e-mail: glazyring@gmail.com

Abstract. Synchronization is a complex operation for switching generator to an electric energy system for parallel operation. Currently, the synchronization process is performed by two traditional methods: manually by human operator or by automatic devices. This operation is accountable for the possible danger to the synchronous generator integrity and to the adjacent part of the energy system. The severity of negative consequences depends on both the synchronization method chosen (ideal synchronization or self-synchronization) and on human factor. To minimize negative impact, the accelerated synchronization method for switching the generator into parallel operation is proposed. Taking into account the different operation modes of the energy system (normal or emergency) and need for rapid commissioning of generating equipment reserves, the most appropriate synchronization methods should be used. The system frequency deviation at the input of the device by 5 Hz results in the error of 0.6 %. In emergency operation, the synchronization process will be performed with the required accuracy as the error of the complex algorithm is within the acceptable range. The system solves the problem of switching to automated control in electricity generation process. Experiments on a physical model confirm that the average duration of synchronization by the accelerated method is two times lower than with accurate synchronization.

Keywords: accelerated method, automatic devices, electromagnetic processes, optimal conditions, synchronizers, synchronization, synchronous generator.

For citation: V.A. Fyodorova, V.F. Kirichenko and G.V. Glazyrin, “Development of automatic device for generator accelerated synchronization”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 32-48, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_32

I. Введение

Процесс производства электроэнергии напрямую связан с эксплуатацией генераторов: их режимами работы, включением и отключением. Каждая генерирующая установка электростанции подвержена процессу синхронизации. Синхронизация – совокупность действий по пуску синхронных генераторов на параллельную работу с электроэнергетической системой (ЭЭС) или другими синхронно вращающимися машинами станции [1]. К данному процессу относится как включение вновь устанавливаемого оборудования и оборудования после ремонтов, так и вынужденный быстрый ввод резервов генерации для ликвидации аварийных ситуаций [2, 3].

На практике процесс синхронизации сопряжен с некоторыми трудностями. Первая проблема: при выполнении синхронизации вручную возрастает вероятность неуспешности процесса в силу наличия человеческого фактора. Это приводит как к износу оборудования, так и к его возможному повреждению. Генерирующее оборудование нуждается в его оснащении устройствами автоматической синхронизации. Вторая проблема: нерациональность использования лишь одного метода синхронизации для пуска оборудования. В различных режимах работы энергосистемы требования к времени синхронизации могут отличаться. Плановая синхронизация относится к нормальным рабочим процессам, когда быстрота включения не имеет первостепенного значения, однако в некоторых случаях требуется быстрый ввод резервов генерации. Таким образом, при каждой синхронизации должен использоваться наиболее подходящий для этого метод. Поскольку синхронизация – неотъемлемая часть процесса производства электроэнергии, ее проведение не должно вызывать выпадение генератора из синхронизма после его включения на параллельную работу с ЭЭС [4, 5].

На основании анализа работ отечественных [6, 7] и зарубежных ученых [8-12], посвященных методам синхронизации и устройствам для ее выполнения, принято решение о разработке автоматического устройства синхронизации на базе комплекса противоаварийной автоматики КПА-М. Это устройство имеет возможность включать генераторы на параллельную работу с энергосистемой различными методами (точной и ускоренной синхронизации), как вручную, так и автоматически. Такое решение позволяет снизить уравнительные токи в момент включения (А) и время осуществления процесса синхронизации (с) не менее, чем на 50 %.

Площадкой проведения эксперимента выступила лабораторная электростанция Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), оснащенная явнополюсным синхронным генератором мощностью 12 кВт.

II. Метод ускоренной синхронизации

На сегодняшний день процесс синхронизации осуществляется двумя традиционными методами: точной синхронизации (ТС) и самосинхронизации (СС), отличающимися алгоритмом выполнения.

При использовании метода ТС для корректного включения генератора на параллельную работу необходимо обеспечить равенство режимных параметров генератора и энергосистемы: т.е. разница амплитуд электродвижущих сил (ЭДС), частот, фаз ЭДС (угол δ между векторами ЭДС) генератора и ЭЭС в пределе должны стремиться к нулю [2]. Основным недостатком метода ТС – длительность выполнения операции из-за необходимости соблюдения перечисленных требований.

Включение генераторов на параллельную работу методом самосинхронизации предполагает включение генератора в сеть в невозбужденном состоянии с последующей подачей тока возбуждения в обмотку ротора. Недостаток метода заключается в возникновении уравнивательных токов большой величины, что вызывает термические и динамические воздействия на агрегат [3].

Для исключения недостатков двух традиционных методов принято решение по созданию некоторого промежуточного метода синхронизации. Сравнение методов, традиционных и предлагаемого, выполнено с использованием численного показателя – величины уравнильного тока:

$$I_{\text{уп}}^* = \frac{\Delta E}{x_d'' + x_c''}, \quad (1)$$

где: ΔE – векторная разность напряжения ЭЭС и генератора; x_d'' – индуктивное сверхпереходное сопротивление генератора; x_c'' – индуктивное сверхпереходное сопротивление энергосистемы.

Для автоматизированного расчета уравнильного тока, возникающего в ходе синхронизации генератора различными методами, и последующего анализа полученных величин разработана математическая модель процесса синхронизации в среде *Matlab*. Основная задача модели – графическая визуализация каждого метода синхронизации (в том числе и предлагаемого промежуточного метода) в виде кривых уравнильного тока от времени (рис. 1). Математическая модель функционирует на основе решения системы дифференциальных уравнений (2), описывающих процесс синхронизации с учетом электромагнитных и электромеханических явлений, имеющих место при ее осуществлении. Получение различных вариантов синхронизации происходит за счет варьирования начальных условий: момента включения (в секундах) и тока возбуждения.

$$\left. \begin{cases} J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_n - M_c - M_{\text{синхр}} - M_p, \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_c. \end{cases} \right\} \quad (2)$$

где: J – момент инерции ротора исследуемого генератора; M_T – момент турбины; M_c – момент сопротивления; $M_{\text{синхр}}$ – синхронный момент; M_p – реактивный момент; ω_r – частота вращения исследуемого генератора; ω_c – частота вращения эквивалентного генератора системы.

Особенность промежуточного метода заключается в расширении диапазона угла δ от 0 до 30-40° в момент включения агрегата и дополнительном снижении тока в обмотке возбуждения до величины меньше номинального значения для холостого хода (6 А). Такое решение позволяет предотвратить появление больших уравнивающих токов. После включения обмотки статора под напряжение сети, ток возбуждения увеличивается до номинального значения при холостом ходе (10 А).

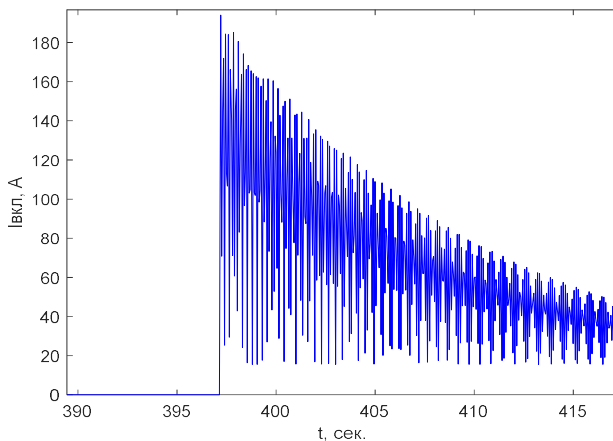


Рис. 1. Изменение уравнивающего тока во времени при использовании метода ускоренной синхронизации

Fig. 1. Time curve form of the equalizing current when using the accelerated method

Метод назван ускоренным, поскольку он позволяет включать генератор на параллельную работу быстрее, чем при точной синхронизации, из-за отсутствия необходимости уравнивания режимных параметров генератора и ЭЭС [13]. Метод ускоренной синхронизации актуален при вклю-

чении оборудования в сеть в аварийных и послеаварийных режимах. Согласно зависимостям, полученным на математической модели для каждого из методов синхронизации [13], использование ускоренного метода снижает уравнительный ток в момент включения генератора (194 А) в 3,6 раз по сравнению с методом самосинхронизации (700 А).

Таким образом, полученные при использовании математической модели значения уравнительного тока подтверждают целесообразность применения метода ускоренной синхронизации и необходимость разработки его алгоритма выполнения с последующей интеграцией в устройство синхронизации.

III. Структура устройства синхронизации

Разработанный автоматический синхронизатор представляет собой подсистему комплекса противоаварийной автоматики КПА-М (производство АО «ИАЭС», г. Новосибирск). Логическая часть устройства реализована на микропроцессорном функциональном блоке. Она позволяет на основе замеров напряжения генератора и энергосистемы вычислять контролируемые параметры и сравнивать их с соответствующими уставками для выдачи определенных управляющих воздействий. Устройство синхронизации может быть декомпозировано и представлено в виде совокупности четырех структурных блоков (рис. 2) [14]:

- 1) блок цифровой обработки входных сигналов;
- 2) блок расчета значений контролируемых величин (угла δ , частоты и действующих значений ЭДС генератора и энергосистемы);
- 3) блок проверки условий синхронизации. Это главная логическая часть устройства или непосредственно сам синхронизатор;
- 4) блок выходных воздействий.

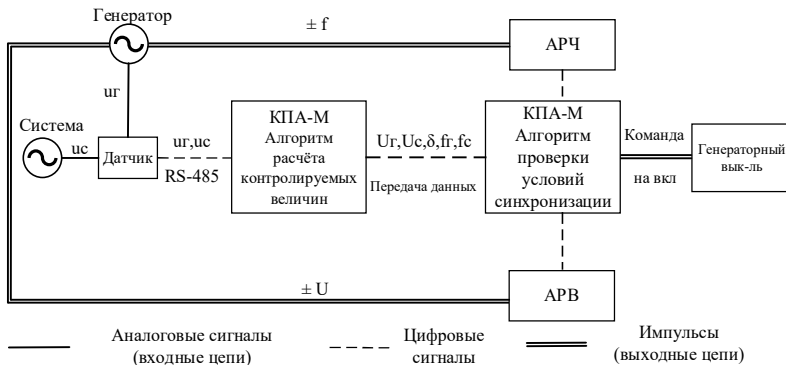


Рис. 2. Структурная схема устройства синхронизации

Fig. 2. Scheme of synchronizer subsystems

IV. Блок цифровой обработки входных сигналов

Разрабатываемое устройство функционирует на базе микропроцессора, т.е. для осуществления им своих функций входные замеры напряжений должны быть оцифрованы. Блок цифровой обработки входных сигналов конструктивно представляет собой специализированные измерительные преобразователи (ИП) ПЦР-Н-02, выполняющие замеры мгновенных значений напряжения в двух точках лабораторной электростанции: на генераторе (u_T) и системе шин (u_C). Результаты измерений передаются в комплекс КПА-М в цифровом виде через последовательный гальванически изолированный интерфейс RS-485. Цифровые сигналы для устройства синхронизации измеряются с частотой дискретизации 1200 Гц. Данная частота подходит для измерения параметров как в нормальном, так и в аварийном режиме работы энергосистемы и соответствует 24 выборкам за один период промышленной частоты [15,16].

V. Блок расчета значений контролируемых величин

Для данной части устройства разработан комплексный алгоритм. Результат его выполнения – определение амплитуды, частоты и фазы двух входных оцифрованных сигналов напряжения генератора и ЭЭС (рис. 3). В КПА-М алгоритм назван «PMU» – *parameters measuring unit*.

Комплексный алгоритм заключается в перемножении входного сигнала с двумя опорными синусоидами. Далее сигналы попадают на фильтр низких частот (ФНЧ) для исключения высокочастотной составляющей 100 Гц. В качестве ФНЧ выбран фильтр скользящего среднего с размером окна, соответствующим периоду промышленной частоты.

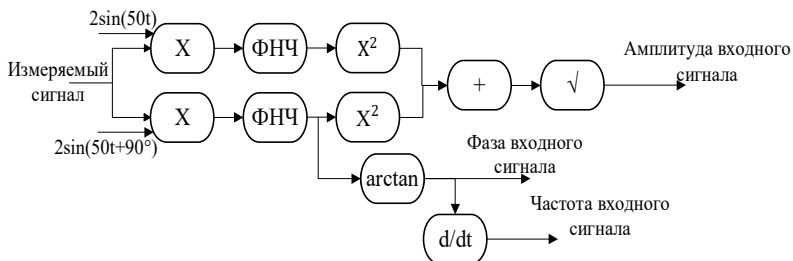


Рис. 3. Блок расчета значений контролируемых величин

Fig. 3. Unit for calculating the controlled values

Точный расчет контролируемых параметров обеспечивает правильную работу всего устройства синхронизации. Наличие фильтров в блоке является причиной некоторых ошибок при расчете значений. Диапазон

допустимых погрешностей расчета величин для целей синхронизации описан в [17, 18]. На основе полученных после фильтрации величин находятся амплитуда, фаза и частота входного сигнала. Данная процедура проводится отдельно для замеров с генератора и ЭЭС, после чего находится угол δ между ними.

VI. Блок проверки условий синхронизации

Данный блок – главная логическая часть устройства. Для него разработан алгоритм, при выполнении которого генератор может быть синхронизирован как ручным, так и автоматическим способом (методами точной и ускоренной синхронизации). Алгоритм синхронизации описан в программном коде и внутри устройства КПА-М назван «*Syn*».

Блок проверки условий синхронизации взаимодействует с блоком расчета значений контролируемых величин и блоком выходных воздействий. По мере выполнения алгоритма синхронизации рассчитываются величины разницы режимных параметров генератора и энергосистемы: угол δ , скольжение s и разница напряжений между генератором и системой ΔU . В случае нахождения параметров в допустимом диапазоне (меньше уставки) условия включения агрегата считаются оптимальными, и алгоритм формирует выходной сигнал на включение генераторного выключателя. Дополнительно в алгоритм вводятся переменные, отражающие неоптимальные условия включения – превышение контролируемыми параметрами заданной уставки. Эти переменные дискретны и имеют два возможных значения: ноль и единица. Равенство переменных единице означает нарушение условий для успешной синхронизации.

После расчета необходимых параметров алгоритм приступает к выполнению цикла выбранного метода синхронизации. Для окончания цикла и выдачи команды на включение должны сойтись три условия:

- 1) ключ на лицевой панели терминала КПА-М должен находиться в определенном положении – ручной, автоматической точной или автоматической ускоренной синхронизации;
- 2) отсутствие блокировки по неоптимальным условиям включения: величина текущих параметров δ , s , ΔU ниже принятых уставок;
- 3) отсутствие блокировки по напряжению, заключающейся в остановке цикла алгоритма синхронизации при исчезновении или снижении величины напряжения ЭЭС ниже 50 % от номинального.

Для достижения оптимальных условий включения агрегата команда на включение выключателя должна подаваться заблаговременно, с некоторым опережением. Это связано с ненулевым временем включения генераторного выключателя. Устройство синхронизации должно прогнозировать подачу команды на включение так, чтобы за время включения выключателя контролируемые параметры достигли оптимальной величины.

Предлагаемое устройство, наряду с современными разработками, является синхронизатором с вычисляемым углом опережения. Угол рассчитывается по (3) в предположении равномерного вращения генератора, что позволяет включить агрегат с наименьшим воздействием на детали машины.

$$\delta_{\text{оп}} = s \cdot t_{\text{ВВ}} \cdot 2\pi, \quad (3)$$

где: $t_{\text{ВВ}}$ – время включения выключателя.

VII. Блок выходных воздействий

Блок выходных воздействий конструктивно объединяет два типа регуляторов: АРВ и АРЧ. При работе регуляторов в составе системы синхронизации АРВ необходимо работать в режиме выполнения заданий по напряжению и току возбуждения, а регулятору АРЧ – по частоте.

Совокупность устройства синхронизации и регуляторов АРЧ и АРВ представляет собой систему автоматического управления (САУ) с обратной связью по частоте, напряжению или току возбуждения, основная цель которой – приведение объекта (синхронного генератора) к заданному состоянию с режимными параметрами близкими к параметрам энергосистемы (рис. 4).

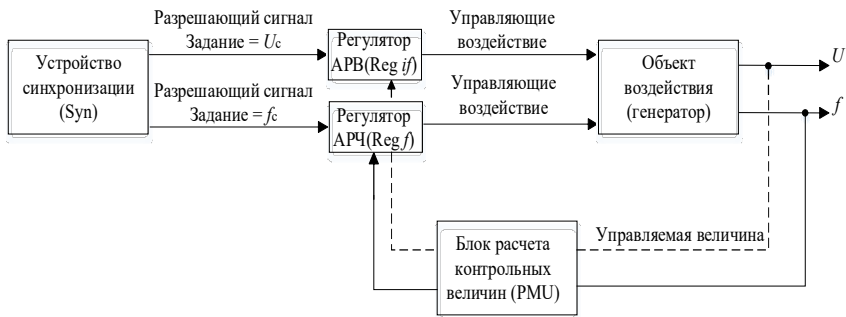


Рис. 4. Совокупность устройства синхронизации и регуляторов АРЧ и АРВ

Fig. 4. Complex of synchronization device and regulators

Блок проверки условий синхронизации формирует два типа выходных сигналов: первый – дискретный, разрешающий регуляторам работу в качестве блока выходных воздействий в составе системы синхронизации, второй – величина, к которой должны быть приближены параметры синхронизируемого генератора (задание на регулятор).

VIII. Экспериментальная проверка разработанного устройства

После разработки алгоритмов функционирования структурных блоков была произведена их интеграция в комплекс КПА-М с помощью формирования набора конфигурационных файлов, описывающих типы сигналов, с которыми взаимодействует устройство синхронизации.

Первая группа входных сигналов – это положения ключа на лицевой панели устройства. Следующую группу составляют входные сигналы, поступающие из алгоритма *PMU* (режимные параметры генератора и ЭЭС). Внутренними сигналами являются переменные δ , s , ΔU , $\delta_{оп}$, рассчитываемые в блоке синхронизации. Выходные сигналы – команды в алгоритмы регуляторов АРВ, АРЧ и на привод генераторного выключателя. Определение величин уставок, согласно которым идентифицируются оптимальные условия включения, произведено экспериментально на реальной физической модели. При определении уставок учтена невозможность допущения несинхронного включения (при угле $\delta = 180^\circ$) и превышение длительности выполнения автоматической синхронизации над ручной. Величины принятых уставок сведены в табл. 1.

Таблица 1.
Уставки, используемые в алгоритме синхронизации

Table 1.
Settings used in the synchronization algorithm

Расшифровка	Наименование уставки	Величина	Единица измерения
Скольжение для метода ТС	$s_{ТС}$	0,25	Гц
Скольжение для метода УС	$s_{УС}$	0,45	Гц
Разница напряжений генератора и ЭЭС	ΔU	5	В
Максимальный угол δ для метода ТС	$\delta_{ТС}$	10	°
Максимальный угол δ для метода УС	$\delta_{УС}$	40	°
Ток возбуждения для метода УС	$i_{УС}$	6	А
Ток возбуждения для метода ТС	$i_{ТС}$	10	А
Время включения $Q_{ген}$	$t_{ВВ}$	0,4	с

Экспериментальная проверка корректности работы устройства синхронизации произведена на синхронном генераторе мощностью 12 кВт. Основные параметры с записанных при проверке устройства осциллограмм представлены в табл. 2.

Согласно рис. 5, при использовании метода ТС максимальный установившийся ток в момент включения достигает величины 32,82 А при включении генератора с углом $\delta = 8,15^\circ$, что почти достигает уставки, равной 10° . Время осуществления процесса составило 79 с.

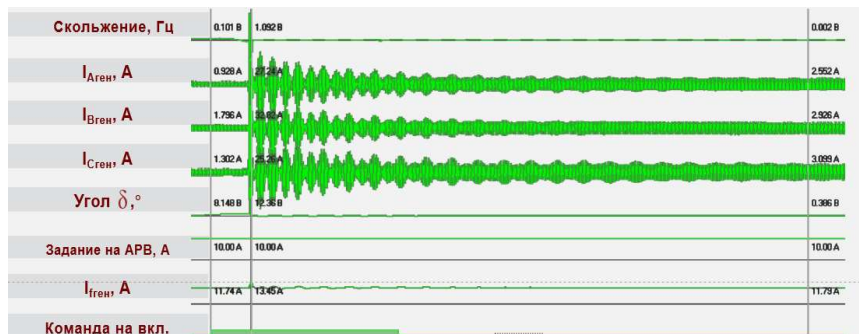


Рис. 5. Осциллограмма метода ТС генератора мощностью 12 кВт

Fig. 5. Oscillogram of the ideal synchronization method

На осциллограмме также отражена фиксация команды отключения на выходе устройства в течение 2 с. Задание на регулятор АРВ постоянно в течение всего времени процесса и равно 10 А. Величина скольжения в момент подачи команды на включение составляет 0,101 Гц и не превышает величины уставки, равной 0,25 Гц.

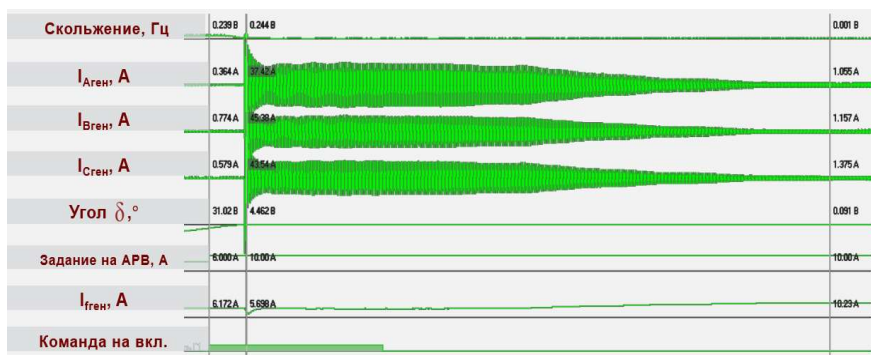


Рис. 6. Осциллограмма метода УС генератора мощностью 12 кВт

Fig. 6. Oscillogram of the accelerated synchronization method

Согласно рис. 6, при использовании метода ускоренной синхронизации максимальный уравнивающий ток достигает величины 45,38 А при включении генератора с углом $\delta = 32,02^\circ$, что почти достигает уставки, равной 40° . Время осуществления процесса составило 41 с. Задание на ре-

гулятор АРВ до подачи команды на включение составляет 6 А, после подачи – 10 А, что соответствует алгоритму действий при использовании метода ускоренной синхронизации: генератор включается с пониженным значением тока возбуждения, а его дальнейшее увеличение до номинального значения происходит уже после включения генераторного выключателя. Величина скольжения в момент включения составляет 0,244 Гц и не превышает величину уставки, равной 0,45 Гц.

Таблица 2.

Результаты экспериментальной проверки устройства синхронизации

Table 2.

Results of experimental verification of the synchronization device

Метод	№ опыта	$I_{ур}$, А	$t_{син}$, с	s , Гц	ΔU , В	δ , °	Среднее значение	
							$I_{ур}$, А	$t_{син}$, с
Точной синхронизации	1	32,82	79	0,1	4,16	8,15	21,34	82,67
	2	27,55	75	0,15	3,4	13,4		
	3	11,68	100	0,14	5,1	7,8		
Ускоренной синхронизации	1	45,38	41	0,24	–	32,02	41,87	39,3
	2	41,43	34	0,04	–	10,2		
	3	39,55	43	0,03	–	4,8		

Средняя длительность выполнения синхронизации ускоренным методом составляет 39 с, что в два раза ниже, чем при методе ТС, а средний уравнивающий ток в момент включения – 42 А, что в 2 раза превышает величину тока при использовании метода ТС.

IX. Заключение

В рамках исследования разработан синхронизатор на базе комплекса противоаварийной автоматики КПА-М, позволяющий выполнять синхронизацию полностью автоматически различными методами с учетом режима работы оборудования. Инновационность и научную значимость работы характеризуют изложенные далее тезисы.

1. Устройство может осуществлять синхронизацию генератора различными методами, в том числе предложенным методом ускоренной синхронизации.

2. Разработан комплексный алгоритм по расчету режимных параметров генератора и энергосистемы. Отклонение замера частоты на входе устройства на 5 Гц обуславливает погрешность расчета угла δ , равную 0,6 %. Алгоритм позволяет определять параметры с требуемой точностью в различных режимах работы энергосистемы.

3. При необходимости включения в сеть нескольких генераторов достаточно установки одного разработанного устройства, поскольку оно обладает возможностью выполнять синхронизацию на нескольких выключателях.

Эффективность внедрения разработанного устройства заключается в снижении издержек на эксплуатацию генератора (ТОиР), поскольку при включении агрегата наиболее подходящими методами создаются оптимальные условия, которые не приводят к возникновению недопустимых термических и механических воздействий на части машины.

Социальная значимость исследования обусловлена исключением человеческого фактора и необходимостью наличия у персонала, осуществляющего синхронизацию вручную, высокой квалификации.

Практическая ценность разработанного устройства – возможность автоматического включения генераторов на параллельную работу различными методами, а также снижение капитальных затрат: одно устройство обеспечивает синхронизацию на нескольких выключателях.

Перспектива использования разработанного устройства: в учебном процессе при выполнении студентами лабораторных работ, в ходе проведения научно-исследовательских работ, а также на реальных объектах электроэнергетики, в частности на крупных синхронных генераторах, для которых ускоренный пуск методом самосинхронизации недопустим.

© Федорова В.А., 2022

© Кириченко В.Ф., 2022

© Глазырин Г.В., 2022

Поступила в редакцию 05.06.2022

Received 05.06.2022

Библиографический список

- [1] Барзам А.Б. Системная автоматика. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
- [2] Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. С.-Пб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2001. – 381 с.
- [3] Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем. М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
- [4] Fishov A., Murashkina I., Marchenko A., Erdenebat E., Ivkin E. Analysis of power system static aperiodic stability with electronic generation // proc. 14 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019), Oct. 14–17, 2019, Tomsk, Russia. Tomsk: TPU Publ. House, 2019. P. 636–641.
- [5] Amin M., Rygg A., Molinas M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: A stability investigation // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2017. №. 32 (2). P. 458–470. DOI: 10.1109/TEC.2017.2661540
- [6] Коновалов Ю.В., Садовский С.А., Кривошеев М.Е., Тихонова А.Е. Исследование электромеханических комплексов с синхронными генераторами при раз-

- личных методах синхронизации // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2018. №. 12. С. 54-57. DOI: 10.36629/2686-777X-2018-1-12-54-57
- [7] Садовский С. А., Алафьева М. А. Исследование переходных процессов при включении синхронных генераторов на параллельную работу // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2017. №. 1 (1). С. 208-215.
- [8] Tian P., Platero C. A., Blázquez F. Protection method for synchronous machine during the paralleling connection process // proc. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Sept. 03-06, 2018, Alexandroupoli, Greece. IEEE, 2018. P. 2385-2390. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8507024
- [9] Bekiroglu E., Bayrak A. Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators // proc. IEEE EUROCON 2009, May 18-23, 2009, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2009. P. 766-771. DOI: 10.1109/EURCON.2009.5167720
- [10] Bolf A., Otčenášová A., Belány P., Suško F. Synchronization device for the model of distribution grid 22 kV // proc. 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE), June 21-24, 2017, Budapest, Hungary. IEEE, 2017. P. 1-4. DOI: 10.1109/IYCE.2017.8003707
- [11] Li H., Zhang H., Xu Q. Design and implementation of integrated control instrument for micro synchronous generation unit // proc. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Nov. 26-28, 2017, Beijing, China. IEEE, 2017. P. 1-6. DOI: 10.1109/EI2.2017.8244409
- [12] Lee S.B., Stone G.C., Antonino-Daviu J., Gyftakis K.N., Strangas E.G., Maussion P., Platero C.A. Condition monitoring of industrial electric machines: State of the art and future challenges // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2020. No. 14 (4). P. 158-167. DOI: 10.1109/MIE.2020.3016138
- [13] Fyodorova V.A., Kirichenko V.F., Glazyrin G.V. Development of digital device for automatic switching into network of educational power station generators // proc. 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Oct. 22-23, 2020, Moscow, Russia. P. 1-18. DOI: 10.1109/RPA51116.2020.9301725
- [14] Fyodorova V., Kornilovich D., Kirichenko V., Glazyrin G., Sidorova A., Litvinova A., Synchronization digital device development for generators automatic connection to the network by various methods // proc. 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC), Nov. 13-15, 2021, Novosibirsk, Russia. IEEE, 2021. P. 89-93. DOI: 10.1109/USSEC53120.2021.9655757
- [15] Burova A. Reducing the error of digital algorithms for deductive signal processing based on their multi-stage discrete Fourier transform by the difference digital filters // 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), March 25-27, 2020, Moscow, Russia. IEEE, 2020. P. 1-3. DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213275
- [16] Kovalenko P.Y., Senyuk M.D., Mukhin V.I., Kornilova D.D. Synchrophasor evaluation based on point-on-wave measurements // proc. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia. P. 155-158. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281245

- [17] Ajala O., Dominguez-Garcia A.D., Liberzon D. An approach to robust synchronization of electric power generators // proc. 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Dec. 17-19, 2018, Miami, FL, USA. IEEE, 2018. P. 1586-1591. DOI: 10.1109/CDC.2018.8618905
- [18] Burova A. Digital signal multi-stage discrete fourier transform and its practical applications // proc. 2021 23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), March 24-26, 2021, Moscow, Russia. IEEE, 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109/DSPA51283.2021.9535810

References

- [1] A.B. Barzam, *Sistemnaya avtomatika [System automation]*. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [2] G.M. Pavlov and G.V. Merkur'ev, *Avtomatika energosistem [Power systems automation]*. St. Petersburg: Centr podgotovki kadrov energetiki, 2001 (in Russian).
- [3] N.I. Ovcharenko, *Avtomatika energosistem [Power systems automation]*. Moscow: MPEI, 2016 (in Russian).
- [4] A. Fishov, I. Murashkina, A. Marchenko, E. Erdenebat and E. Ivkin, "Analysis of power system static aperiodic stability with electronic generation", in proc. *XIV International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019)*, Oct. 14–17, 2019, Tomsk, Russia, pp. 636-641.
- [5] M. Amin, A. Rygg and M. Molinas, "Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: A stability investigation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 32, no. 2, pp. 458-470, June 2017. DOI: 10.1109/TEC.2017.2661540
- [6] Y.U. Konovalov, S.A. Sadovcki, M.E. Krivosheev and A.E. Tikhonova, "Study of electromechanical complexes with synchronous generators with different synchronization modes", *Bulletin of the Angarsk State Technical University*, vol. 12, pp. 54-57, Dec. 2018. DOI: 10.36629/2686-777X-2018-1-12-54-57
- [7] S.A. Sadowski and M.A. Alafieva, "Investigation of transient processes when synchronous generators are switched on for parallel operation", *Scientific Papers Collection of the Angarsk State Technical University*, vol. 1, no. 1, pp. 208-215, 2017.
- [8] P. Tian, C. A. Platero and F. Blázquez, "Protection method for synchronous machine during the paralleling connection process", in proc. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Sept. 03-06, 2018, Alexandroupoli, Greece, pp. 2385-2390. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8507024
- [9] E. Bekiroglu and A. Bayrak, "Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators", in proc. *IEEE EUROCON 2009*, May 18-23, 2009, St. Petersburg, Russia, pp. 766-771. DOI: 10.1109/EURCON.2009.5167720
- [10] A. Bolf, A. Otčenášová, P. Belány and F. Suško, "Synchronization device for the model of distribution grid 22 kV", in proc. *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, June 21-24, 2017, Budapest, Hungary, pp. 1-4. DOI: 10.1109/IYCE.2017.8003707
- [11] H. Li, H. Zhang and Q. Xu, "Design and implementation of integrated control instrument for micro synchronous generation unit", in proc. *IEEE Conference on En-*

- ergy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Nov. 26-28, 2017, Beijing, China, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EI2.2017.8244409
- [12] S.B. Lee, G.C. Stone, J. Antonino-Daviu, K.N. Gyftakis, E.G. Strangas, P. Maussion and C.A. Platero, “Condition monitoring of industrial electric machines: State of the art and future challenges”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 158-167, Dec. 2020. DOI: 10.1109/MIE.2020.3016138
- [13] V.A. Fyodorova, V.F. Kirichenko and G.V. Glazyrin, “Development of digital device for automatic switching into network of educational power station generators”, in proc. *3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA)*, Oct. 22-23, 2020, Moscow, Russia, pp. 1-18. DOI: 10.1109/RPA51116.2020.9301725
- [14] V. Fyodorova, D. Kornilovich, V. Kirichenko, G. Glazyrin, A. Sidorova and A. Litvinova, “Synchronization digital device development for generators automatic connection to the network by various methods”, in proc. *Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC)*, Nov. 13-15, 2021, Novosibirsk, Russia, pp. 89-93. DOI: 10.1109/USSEC53120.2021.9655757
- [15] A. Burova, “Reducing the error of digital algorithms for deductive signal processing based on their multi-stage discrete Fourier transform by the difference digital filters”, in proc. *22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*, March 25-27, 2020, Moscow, Russia, pp. 1-3. DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213275
- [16] P.Y. Kovalenko, M.D. Senyuk, V.I. Mukhin and D.D. Kornilova, “Synchrophasor evaluation based on point-on-wave measurements”, in proc. *2020 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC)*, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 155-158, 2020. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281245
- [17] O. Ajala, A.D. Dominguez-Garcia and D. Liberzon, “An approach to robust synchronization of electric power generators”, in proc. *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Dec. 17-19, 2018, Miami, FL, USA, pp. 1586-1591. DOI: 10.1109/CDC.2018.8618905
- [18] A. Burova, “Digital signal multi-stage discrete fourier transform and its practical applications”, in proc. *23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*, March 24-26, 2021, Moscow, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/DSPA51283.2021.9535810

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Федорова Виктория Александровна, магистрант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Viktoriya A. Fyodorova, master student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Кириченко Виктор Федорович, магистрант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Viktor F. Kirichenko, master student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Глазырин Глеб Владимирович, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Gleb V. Glazyrin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation