

УДК 621.316.729

АЛГОРИТМЫ ЭТАЛОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВ АДАПТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ И ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю.В. Хрущев, Н.А. Беляев

Томский политехнический университет

E-mail: B.N.A.tsk@gmail.com

Для создания адаптивных устройств синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем с улучшенными эксплуатационными характеристиками предлагается использовать технологию построения систем автоматического управления с эталонной моделью. При этом в качестве эталонных моделей рассматриваются программные траектории движения для параметров относительного движения векторов напряжения генераторов и частей электроэнергетических систем, формируемые на интервале управления процессом синхронизации. Представлена обобщённая структурно-функциональная схема устройства адаптивной синхронизации, и приведены два перспективных алгоритма работы эталонной модели, каждый из которых без перерегулирования доставляет нулевые значения кинетической и потенциальной энергий относительного движения синхронизируемых объектов в конце интервала управления. Проведена апробация указанных алгоритмов путем моделирования процесса синхронизации частей энергосистемы в программном комплексе Mustang.

Ключевые слова:

Электроэнергетическая система, синхронный генератор, синхронизация, устройство синхронизации, структурно-функциональная схема, эталонная модель, алгоритм.

Введение

При синхронизации генератора с электрической сетью, как и при синхронизации частей электроэнергетических систем (ЭЭС), на контактах объединяющего выключателя (ОВ) к моменту его включения должны быть обеспечены следующие условия [1]:

- идентичность чередования фаз напряжений;
- равенство напряжений по абсолютному значению;
- совпадение по фазе векторов напряжений;
- равенство частот напряжений.

Идентичность чередования фаз напряжений на контактах ОВ обычно обеспечивается на этапе предпусковых испытаний, и поэтому какие-либо дополнительные управляющие воздействия в процессе синхронизации в этом направлении не требуются.

Следствием несовпадения векторов напряжений по модулю и фазе является возникновение уравнительного и ударного токов включения, обусловленных геометрической разностью между этими векторами и, соответственно, между эквивалентными электродвижущими силами синхронизируемых частей ЭЭС. При этом вследствие изменения параметров угловых характеристик на валах электрических машин образуются небалансы между механическими и электромагнитными моментами, что приводит к синхронным качаниям и, в тяжёлых случаях, к потере динамической устойчивости ЭЭС.

С позиции энергетической трактовки происходящих явлений можно констатировать, что при несовпадении векторов напряжений в момент включения ОВ в синхронизируемых частях ЭЭС образуется некоторая величина распределенной между электрическими машинами потенциальной энергии относительного движения, являющейся исходной причиной последующих синхронных качаний.

В случае, когда включение ОВ производится при неравенстве частот, вращающиеся части электрических машин синхронизируемых частей изначально имеют кинетическую энергию относительного движения, что также приводит к последующим синхронным качаниям и может закончиться потерей динамической устойчивости ЭЭС.

По существу перечисленные условия синхронизации, за исключением первого, сводятся к тому, что к моменту включения ОВ в синхронизируемых частях должны быть обеспечены нулевые значения потенциальной и кинетической энергий относительного движения вращающихся частей электрических машин.

Следует отметить, что геометрическое равенство векторов напряжения на контактах ОВ не является гарантией начального отсутствия потенциальной энергии относительного движения электрических машин в составе синхронизируемых частей ЭЭС. Нулевые значения угла между векторами напряжения на контактах ОВ и скорости его изменения могут быть получены при ненулевом значении относительного ускорения, что послужит причиной последующих синхронных качаний.

Как следует из уравнения движения вращающейся части электрической машины, величина её относительного ускорения пропорциональна небалансу моментов на валу, ненулевое значение которого свидетельствует о наличии потенциальной энергии относительного движения. Соответственно и ненулевое значение относительного ускорения между векторами напряжения на контактах ОВ в момент его включения проявится в виде ненулевого начального значения потенциальной энергии.

Из приведённых соображений следует, что для полного исключения синхронных качаний в ЭЭС в дополнение к известному перечню условий син-

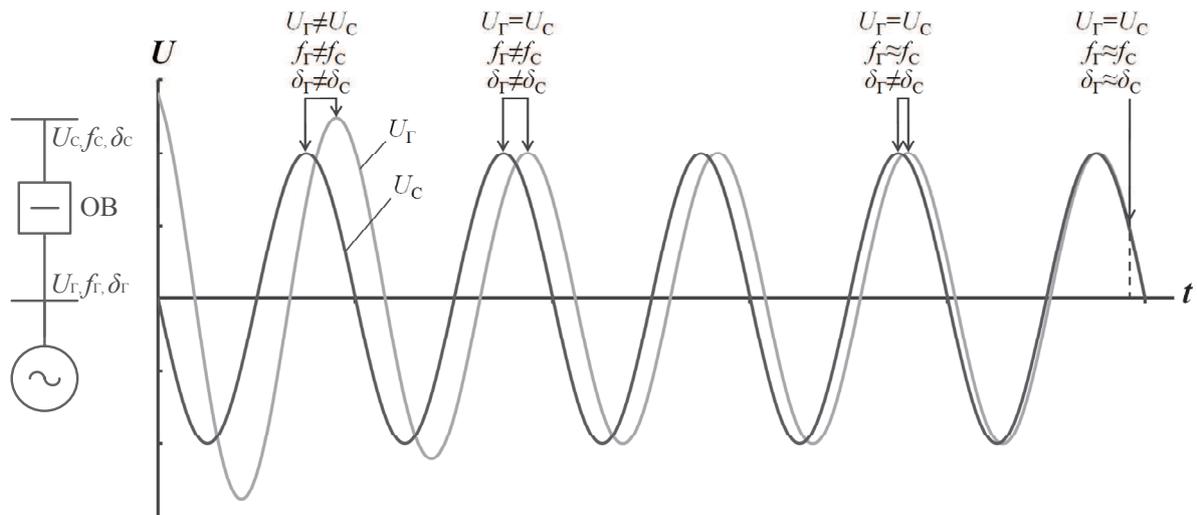


Рис. 1. Процесс работы современного устройства точной автоматической синхронизации по алгоритму подгонки и ожидания для случая синхронизации генератора с сетью

хронизации необходимо обеспечить равенство первых производных частоты напряжений на контактах ОБ.

Необходимость выполнения этого условия в технической литературе не обсуждается и в нормативных документах не отражается. Соответственно, это условие отсутствует в законах управления устройств синхронизации. Алгоритмы современных устройств точной синхронизации заключаются в подгонке частот напряжений синхронизируемых частей ЭЭС и ожидании момента, когда угол между векторами этих напряжений окажется в предусмотренной нормативами допустимой зоне.

Общим недостатком существующих устройств синхронизации, в том числе и наиболее совершенных [2, 3], является отсутствие формализованной процедуры перевода используемых в процессе синхронизации параметров состояния к необходимым для точной синхронизации значениям. Подгонка и ожидание, составляющие основу алгоритмов их работы (рис. 1), по существу вносят неопределённость в задачу повышения точности и уменьшения длительности достижения конечных значений используемых для точной синхронизации режимных параметров. При этом, как отмечено, не предусматривается достижение равенства первых производных частоты напряжения синхронизируемых частей ЭЭС.

Более эффективным для решения этой задачи представляется подход, развиваемый в Энергетическом институте Томского политехнического университета [4, 5]. Суть этого подхода заключается в приложении методов автоматического управления с эталонной моделью и методов управления программным движением объектов [6] к задаче управления динамическими переходами энергосистем [7], в том числе к задаче синтеза устройств адаптивной синхронизации повышенного качества. При этом эталонная модель вводится для решения конкретной задачи – сформировать расчет-

ную траекторию, доставляющую нулевые значения угла, скорости и ускорения относительного вращательного движения векторов напряжения на контактах объединяющего выключателя. В теории автоматического управления траектории такого типа называются программными траекториями движения (ПТД), а движение объекта по ПТД – программным [6].

ПТД, предназначенные для решения задачи точной синхронизации, в первом варианте построены в [8]. Недостатком этих ПТД является ступенчатость и знакопеременный характер функции изменения относительного ускорения, что в общем случае усложняет процесс формирования управляющих воздействий. Во избежание этих осложнений разработаны и представлены далее ПТД, лишённые отмеченного недостатка.

Алгоритмы работы эталонной модели

Основу синтезируемого устройства синхронизации составляет типовая структурно-функциональная схема систем автоматического управления с эталонной моделью, адаптированная к условиям работы в составе ЭЭС (рис. 2). Эталонная модель в этой схеме формируется в ходе процесса в виде программной траектории движения (ПТД), представляющей собой рассчитанное (желаемое) движение векторов напряжения генератора и сети или синхронизируемых частей ЭЭС. Принимая во внимание, что равенство напряжений по абсолютному значению достигается воздействием на автоматический регулятор возбуждения генератора, что не представляет существенных трудностей [9], основным целевым условием построения ПТД является достижение нулевых значений управляемых параметров: относительного угла ($\delta = \delta_2 - \delta_1 = 0$), относительной скорости (разности частот) ($\nu = \omega_2 - \omega_1 = 0$) и относительного ускорения ($\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = 0$) векторов напряжения синхронизируемых объектов в конечной точке интервала управления.

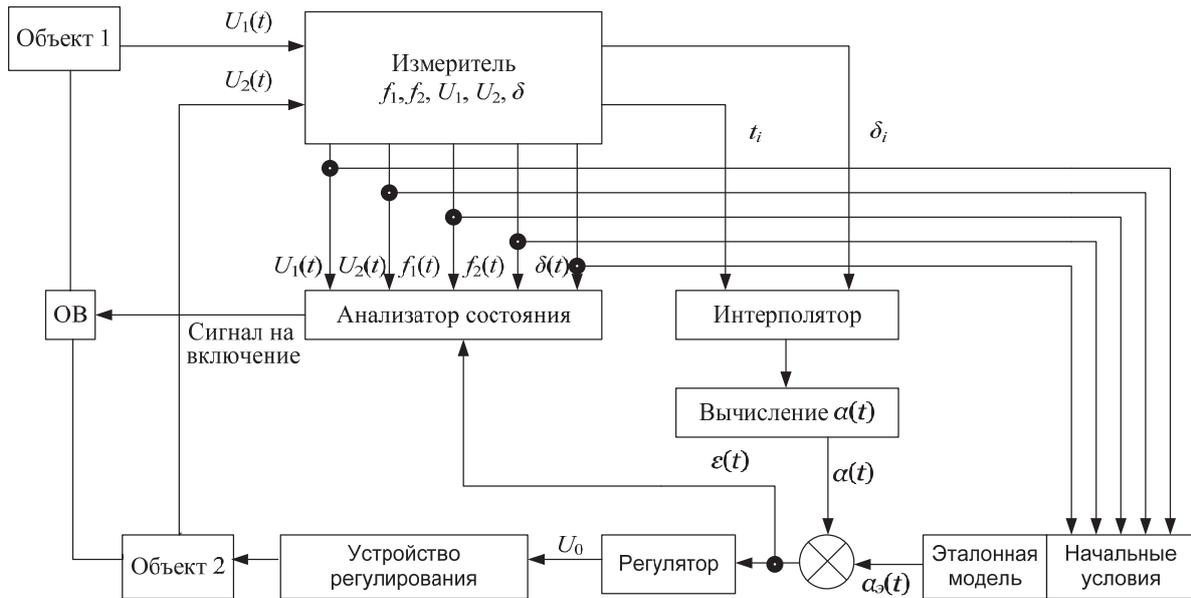


Рис. 2. Структурно-функциональная схема устройства синхронизации объектов 1 и 2 (генератор–сеть или две части ЭЭС) с эталонной моделью

Взаимосвязь между параметрами относительно движения векторов напряжения на контактах ОВ выражается дифференциальным соотношением:

$$\alpha = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (1)$$

В алгоритмах ПТД, доставляющих нулевые значения относительного угла и его производных, может предусматриваться, на интервале управления, наличие или отсутствие перерегулирования процесса. В алгоритмах первой группы (с перерегулированием [4, 8]) формируются положительные и отрицательные значения функции относительного ускорения, что приводит к необходимости использования знакопеременных управляющих воздействий. В алгоритмах второй группы формируется относительное ускорение одного знака [5], для реализации которого требуются знакопостоянные управляющие воздействия. Для аппаратной реализации законов управления более удобны, очевидно, алгоритмы второй группы.

В алгоритмах второй группы интервал управления ПТД охватывает несколько периодов разности частот, предшествующих моменту включения ОВ. Вид функции относительного ускорения на этом интервале может быть различным, однако ее численное содержание должно быть знакопостоянным и к концу интервала управления доставлять нулевые значения управляемых параметров.

Наиболее простыми функциями, удовлетворяющими этим условиям, являются постоянное ускорение и ускорение с постоянной производной. Движение, соответствующее постоянному ускорению, в технической литературе называется равноускоренным. Для движения, соответствующего ускорению с постоянной производной, общеприня-

тое название отсутствует. Далее оно названо равномерно ускоренным движением.

В общем случае, согласно (1), ПТД для алгоритма равноускоренного движения имеют вид:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \text{const}, \\ v_p &= v_{p0} + \alpha_p t, \\ \delta_p &= \delta_{p0} + v_{p0} t + 0,5\alpha_p t^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где δ_{p0} , v_{p0} – начальные значения (в момент $t=t_0$) относительного угла и относительной скорости. Индексом p обозначены расчетные (программные) значения параметров.

Согласно принятым конечным условиям в конце интервала управления (момент $t=t_T$ на рис. 3) значения параметров относительного движения векторов напряжения синхронизируемых объектов становятся равными нулю: $\delta_{pT}=0$, $v_{pT}=0$, $\alpha_{pT}=0$. Задача заключается в том, чтобы была определена ПТД, переводящая синхронизируемый объект из произвольного начального состояния t_0 , δ_{p0} , v_{p0} , α_{p0} в конечное состояние $t=t_T$, $\delta_{pT}=0$, $v_{pT}=0$, $\alpha_{pT}=0$ за время $T=t_T-t_0$ при постоянном ускорении.

Требование сохранения знакопостоянного (в данном случае постоянного) ускорения может быть выполнено лишь в том случае, когда на интервале управления $[t_0, t_T]$ будет осуществляться некоторое количество n_p полных оборотов векторов напряжений на контактах ОВ друг относительно друга. Заранее это количество неизвестно. Оно определяется при формировании ПТД в зависимости от принимаемого значения относительного ускорения α_p на интервале управления.

Количество n_p определим на основании выражения (2) для относительной скорости в момент времени t_T

$$v_{pT} = v_{p0} + \alpha_p T = 0. \quad (3)$$

Выражая из (3) α_p , получим

$$\alpha_p = -\frac{v_{p0}}{T}. \quad (4)$$

С учетом (4) уравнение для относительного угла принимает вид:

$$\delta_{pT} = \delta_{p0} + v_{p0}T - 0,5\frac{v_{p0}}{T}T^2 = \delta_{p0} + 0,5v_{p0}T. \quad (5)$$

С учетом n_p количества оборотов векторов напряжений на контактах ОВ друг относительно друга и конечных условий из уравнения (5) следует:

$$\delta_{pT} = \delta_{p0} + 0,5v_{p0}T + 2\pi n_p = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) относительно длительности T интервала управления $[t_0, t_T]$ приводит к результату:

$$T = \frac{-2\pi n_p - \delta_{p0}}{0,5v_{p0}} = -2\frac{(2\pi n_p + \delta_{p0})}{v_{p0}}. \quad (7)$$

Соответственно, выражение (4) с учетом (7) принимает вид:

$$\alpha_p = \frac{v_{p0}^2}{2(2\pi n_p + \delta_{p0})}. \quad (8)$$

Основанием для выбора n_p может служить сложившееся к моменту t_0 реальное относительное ускорение α_0 . Подставив в уравнение (8) значение α_0 вместо α_{p0} , получим выражение для определения оценочного значения n'_p количества оборотов:

$$n'_p = \frac{-2\alpha_0\delta_{p0} + v_{p0}^2}{4\alpha_0\pi}. \quad (9)$$

В общем случае n'_p , полученное на основании (9), будет иметь дробное значение, подлежащее округлению. При этом в качестве расчетного числа оборотов n_p следует принимать ближайшее большее значение, поскольку в дальнейшем на интервале управления могут потребоваться пересчеты, последующие результаты которых не должны значительно отличаться от предыдущих.

В случаях, когда реальное ускорение α_0 не позволяет определить приемлемое количество полных оборотов, следует задать начальное ускорение, исходя из конкретных требований к процессу синхронизации.

Согласно принятому правилу округления при вычислении n_p в общем случае будет получаться $\alpha_{p0} \approx \alpha_0$. В частном случае, когда $\alpha_{p0} = \alpha_0$, дополнительных управляющих воздействий в момент t_0 не требуется. В случае, когда $\alpha_{p0} \neq \alpha_0$, выполняются управляющие воздействия, приводящие к равенству $\alpha_{p0} = \alpha_0$. При мгновенном (теоретическом) изменении относительного ускорения до значения α_{p0} в момент $t=t_0$ дальнейшее протекание процесса будет таким же, как и в частном случае при $\alpha_{p0} = \alpha_0$.

К недостаткам алгоритма программной траектории равноускоренного движения следует отнести необходимость резкого снятия управляющих воздействий посредством скачкообразного подведе-

дения относительного ускорения к нулевому значению (рис. 3), что может затруднить реализацию закона на конечной стадии интервала управления. Более совершенным в этом отношении является алгоритм программной траектории равномерно ускоренного движения.

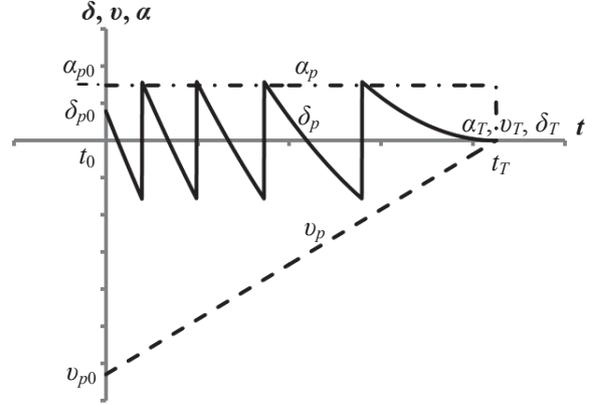


Рис. 3. Пример построения ПТД на основе алгоритма равноускоренного движения

Основу программной траектории равноускоренного движения (рис. 4) составляет линейная функция относительного ускорения на всем интервале управления, что обеспечивает плавное подведение параметров относительного движения векторов напряжений к нулевым значениям в ходе процесса синхронизации.

В общем виде аналитические выражения для расчета параметров ПТД в случае равноускоренного движения могут быть представлены в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 2d_2 + 6d_3t, \\ v_p &= d_1 + 2d_2t + 3d_3t^2, \\ \delta_p &= d_0 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3, \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты d_0, d_1, d_2 определяются исходя из начальных условий ($t=t_0$):

$$\begin{aligned} d_2 &= \frac{\alpha_{p0}}{2}, \\ d_1 &= v_{p0}, \\ d_0 &= \delta_{p0}. \end{aligned} \quad (11)$$

Неизвестными при постановке задачи являются расчетное начальное значение относительного ускорения α_{p0} , обеспечивающее одновременность выполнения конечных условий и соответствующее этим условиям значение коэффициента d_3 .

Принимая во внимание, что в момент времени $t=t_T$ значение относительного ускорения будет равно нулю, на основании первого уравнения группы (10) получим

$$d_3 = -\frac{2d_2}{6T} = -\frac{\alpha_{p0}}{6T}. \quad (12)$$

С учетом (11, 12), а также принимая, что в процессе управления векторы напряжений на контак-

тах ОВ совершат n_p полных оборотов друг относительно друга, уравнения для относительной скорости и относительного угла в момент времени t_T принимают вид:

$$\begin{aligned} v_{pT} &= v_{p0} + \alpha_{p0}T - \frac{\alpha_{p0}}{2T}T^2 = v_0 + \frac{\alpha_{p0}T}{2} = 0, \\ \delta_{pT} &= \delta_{p0} + v_{p0}T + \frac{\alpha_{p0}T^2}{2} - \frac{\alpha_{p0}}{6T}T^3 + 2\pi n_p = \\ &= \delta_{p0} + v_{p0}T + \frac{\alpha_{p0}T^2}{3} + 2\pi n_p = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

На основании первого уравнения системы (13) получим желаемое (программное) значение относительного ускорения α_{p0} в начальный момент времени

$$\alpha_{p0} = -\frac{2v_{p0}}{T}. \quad (14)$$

С учетом (14) второе уравнение системы (13) принимает вид:

$$\begin{aligned} \delta_{p0} + v_{p0}T - \frac{2v_{p0}T}{3} + 2\pi n_p &= \\ = \delta_{p0} + \frac{v_{p0}T}{3} + 2\pi n_p &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Преобразовав (15), получим выражение для определения времени управления T :

$$T = -3 \frac{\delta_{p0} + 2\pi n_p}{v_{p0}}. \quad (16)$$

Исключив в (14) время T с помощью (16), получим

$$\alpha_{p0} = \frac{2v_{p0}^2}{3(\delta_{p0} + 2\pi n_p)}. \quad (17)$$

Оценочное значение n'_p определяется по выражению (17) подстановкой реального α_0 вместо его программного α_{p0} значения:

$$n'_p = \frac{-1,5\alpha_0\delta_{p0} + v_{p0}^2}{3\alpha_0\pi}. \quad (18)$$

Целое количество относительных оборотов определяется на основании n'_p , полученного из (18), путем его округления до большего значения.

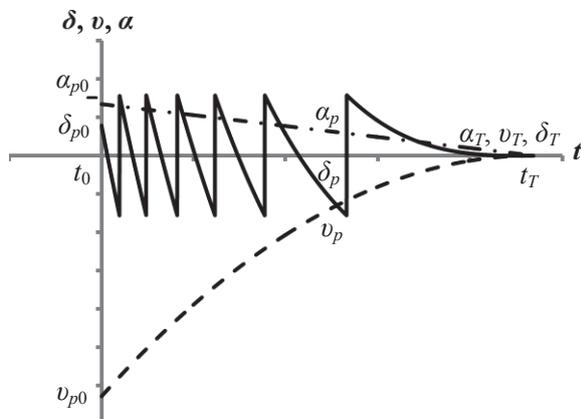


Рис. 4. Пример построения ПТД на основе алгоритма равномерно ускоренного движения

Изменение параметров относительного движения векторов напряжения синхронизируемых объектов осуществляется путем воздействия на устройство регулирования (рис. 2), для которого на основании построенных ПТД определяется величина и форма управляющих воздействий. Для задачи синхронизации генератора с сетью в качестве устройства регулирования выступает регулятор скорости генератора, а управляющие воздействия осуществляются путем изменения небаланса мощности на валу генератора ΔP . С учетом требуемого значения относительного ускорения значение ΔP может быть вычислено на основании упрощенного уравнения движения ротора генератора:

$$\Delta P = P_T - P = \frac{\alpha T_j}{\omega_r}, \quad (19)$$

где T_j – постоянная инерции вращающейся части энергоагрегата (с); ω_r – угловая скорость (рад/с); P_T – мощность турбины (о.е.); P – электрическая мощность генератора (о.е.).

Для задачи синхронизации частей энергосистемы в качестве управляющих устройств могут выступать как регуляторы скорости генераторов электростанций, так и любые другие устройства, способные обеспечить изменение параметров относительного движения векторов напряжения синхронизируемых частей по построенным для них траекториям.

Апробация изложенных алгоритмов построения ПТД была осуществлена посредством моделирования процесса включения на параллельную работу частей энергосистемы в программном комплексе Mustang (рис. 5). При этом воспроизводилась следующая схемно-режимная ситуация: энергосистема состоит из двух частей (1 и 2 на рис. 5), связанных между собой воздушной линией (ВЛ), управление процессом синхронизации осуществляется посредством воздействия на регулятор скорости генератора марки ТВФ-63-2УЗ первой части, вторая часть энергосистемы представлена шиной бесконечной мощности. Величина управляющих воздействий определялась на основании выражения (19). Параметры, использованные для моделирования генератора ТВФ-63-2УЗ, представлены в [10]. В момент времени t_T подается команда на включение объединяющего выключателя. На основании заданных начальных параметров были рассчитаны законы изменения небаланса мощности генератора, соответствующие изложенным алгоритмам. Полученные законы были выполнены на указанной модели. Инерционность исполнительных органов не учитывалась.

Полученные результаты моделирования представлены на рис. 6. В силу особенностей моделирующего комплекса зависимость относительного угла от времени представлена в виде убывающей кривой, приобретающей к моменту снятия управляющих воздействий и включения генератора на параллельную работу с сетью значение, кратное 360° .

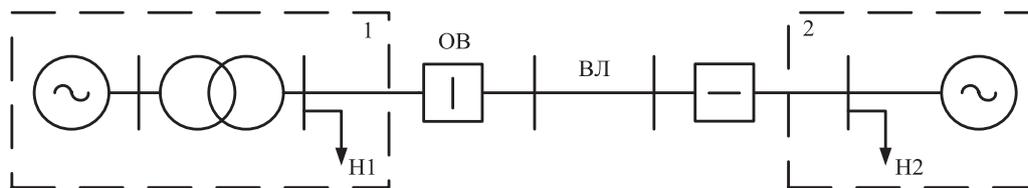


Рис. 5. Схема моделируемой энергосистемы

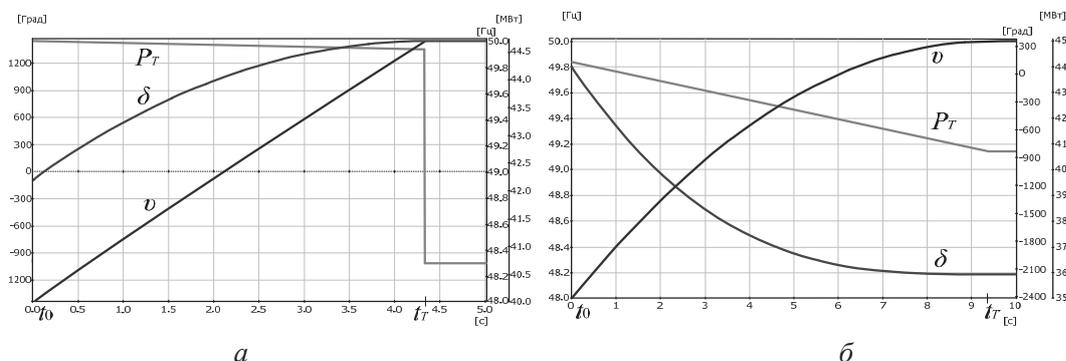


Рис. 6. Результаты моделирования процесса синхронизации по алгоритмам ПТД: а) равноускоренного движения; б) равномерно ускоренного движения

Из рис. 6 видно, что в идеализированных условиях моделирования изложенные выше алгоритмы построения ПТД (рис. 3, 4) и реальные траектории движения ротора генератора совпадают. В реальных условиях обеспечить идеальное движение по построенным траекториям невозможно из-за наличия случайных внешних возмущений, несовершенства измерительных устройств, инерционности систем регулирования и других факторов. Одной из задач дальнейших исследований является разработка алгоритмов коррекции отклонений параметров реальных процессов синхронизации от параметров ПТД. Успешное решение этой задачи является неперенным условием перехода к этапу опытно-конструкторской разработки устройств синхронизации с эталонной моделью.

Выводы

Для получения минимальных (в идеальном случае нулевых) значений кинетической и потенциальной энергий относительного движения син-

хронных электрических машин в момент включения на параллельную работу синхронизируемых частей ЭЭС необходимо, чтобы к этому моменту были обнулены угол, скорость и ускорение относительного движения векторов напряжения на контактах объединяющего выключателя. Эта задача может быть решена с помощью устройств синхронизации, действующих по принципу устройств автоматического управления с эталонной моделью. При этом в качестве эталонных моделей могут быть приняты программные траектории движения, представляющие нулевые значения параметрам относительного движения к концу интервала управления. Рациональным вариантом являются ПТД, построенные на основе знакопостоянных функций относительного ускорения, таких, например, как программные траектории равноускоренного и равномерно ускоренного движения. В этом варианте упрощается задача формирования управляющих воздействий, обеспечивающих движение по ПТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
2. Агачев Е.С., Лукоянов В.Ю., Панфилов Н.И. Автоматический микропроцессорный синхронизатор «Спринт» мощного синхронного генератора // Электрические станции. – 1999. – № 8. – С. 48–51.
3. SYNCHROTACT. Synchronizing and paralleling devices and systems // Data sheet. – ABB, Switzerland, 2007.
4. Способ синхронизации возбужденной синхронной машины с сетью: пат. 2359384 Рос. Федерация. № 2008106520/09; заявл. 19.02.2008; опубл. 20.06.2009, Бюл. № 17. – 13 с.
5. Способ синхронизации возбужденной синхронной машины с сетью: пат. 2457597 Рос. Федерация. № 2011120883/07; заявл. 24.05.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.
6. Тимофеев А.В. Построение адаптивных систем управления программным движением. – Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1980. – 88 с.

7. Хрущёв Ю.В. Управление движением генераторов в динамических переходах энергосистем. – Томск: STT, 2001. – 310 с.
8. Абеуов Р.Б., Заподовников К.И., Хрущёв Ю.В. О возможности автоматического управления процессом точной синхронизации генераторов мини-ТЭС по программным траекториям движения // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 7–8/1. – С. 43–47.
9. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.
10. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

Поступила 19.04.2013 г.

UDC 621.316.729

ALGORITHMS OF MASTER MODELS FOR DESIGNING GENERATORS AND POWER SYSTEM PARTS SYNCHRONIZER

Yu.V. Khrushchev, N.A. Belyaev

Tomsk Polytechnic University

The technique for designing the automated control systems with a master model is proposed to be used for developing the adaptive devices for synchronizing generators and power system parts with high performance. The program motion trajectories for relative movement parameters of generator stress vectors and the parts of power systems formed on a control interval by synchronization are considered as the master models. The paper introduces the generalized structural-functional scheme of adaptive synchronization device and two advanced algorithms of master model operation. Each algorithm without overshoot delivers zero kinetic and potential energy values of synchronized object relative motion at the end of control interval. The authors tested the algorithms modeling synchronization of power system parts in Mustang.

Key words:

Power system, synchronous generator, synchronization, synchronizer, structural-functional scheme, master model, algorithm.

REFERENCES

1. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh* (transient electromechanical processes in electromechanical systems). Moscow, Vysshaya shkola, 1985. Iss. 4, 536 p.
2. Aganichev E.S., Lukoyanov V.Yu., Panfilov N.I. *Elektricheskie stantsii*, 1999. 8, pp. 48–51.
3. *SYNCHROТАCT. Synchronizing and paralleling devices and systems*. Data sheet. ABB, Switzerland, 2007.
4. Abeuov R.B., Dzhumik D.V. *Sposob sinkhronizatsii vzbuzhdennoy sinkhronnoy mashiny s setyu* (The way to synchronize exited synchronous machine with a power grid). Patent 2359384 RF, no. 2008106520/09, 2009.
5. Belyaev N.A., Khrushchev Yu.V. *Sposob sinkhronizatsii vzbuzhdennoy sinkhronnoy mashiny s setyu* (The way to synchronize exited synchronous machine with a power grid). Patent 2457597 RF, no. 2011120883/07, 2012.
6. Timofeev A.V. *Postroenie adaptivnykh sistem upravleniya programmym dvizheniem* (The design of adaptive systems of controlling program motion). Leningrad, Energiya, 1980. 88 p.
7. Khrushchev Yu.V. *Upravlenie dvizheniem generatorov v dinamicheskikh perekhodakh energosistem* (Control of generator motion in dynamic transitions of electric power systems). Tomsk, STT, 2001. 310 p.
8. Abeuov R.B., Zapodovnikov K.I., Hrushchev Yu.V. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2008. 7–8/1, pp. 43–47.
9. Ovcharenko N.I. *Avtomatika elektricheskikh stantsiy i elektroenergeticheskikh sistem* (Automation of electric power plant and electric power systems). Moscow, NTs ENAS Publ., 2000. 504 p.
10. Neklepaev B.N., Kryuchkov I.P. *Elektricheskaya chast elektrostantsiy i podstantsiy: spravochnye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya* (Electrical part of electric power plants and substations: reference materials for course and diploma design). Moscow, Energoatomizdat, 1989. 4 Iss., 608 p.