



КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ

УДК 621.313

РЯБЕНЬКИЙ Владимир Михайлович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники и электронных систем
Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова.

Научные интересы: автоматизация электроэнергетических систем, компьютеризированные системы управления.

УШКАРЕНКО Александр Олегович

к.т.н., доцент кафедры теоретической электротехники и электронных систем
Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова.

Научные интересы: автоматизация электроэнергетических систем,
информационное обеспечение электроэнергетических систем.

Язид Джамал Исмаил Альшайх

аспирант кафедры теоретической электротехники и электронных систем
Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова.

Научные интересы: компьютерное моделирование электроэнергетических систем,
имитационное моделирование в электроэнергетике.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной автономной электроэнергетики сопровождается внедрением сложных алгоритмов контроля и управления, сбора и обработки информации, алгоритмов прогнозирования и принятия решений, основой которых становятся микропроцессорные системы управления.

Цифровые системы, осуществляющие управление в реальном масштабе времени, являются весьма сложными для анализа гибридными объектами. Различные части системы имеют разную природу (непрерывный объект и дискретная управляющая часть), а система в целом описывается сложной комбинацией дифференциальных уравнений, алгебраических уравнений и неравенств и логических условий [1]. В этих условиях аналитический анализ поведения цифровых систем

управления и автоматизации затруднен, поэтому актуальными являются задачи компьютерного моделирования. При этом компьютерная модель должна отражать как непрерывную часть системы, так и дискретную.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Повышение стоимости дизельного топлива приводит к необходимости перевода дизельных машин на газ. Газодизель-генераторные агрегаты находят все более широкое применение ввиду своей экономичности. По сравнению с дизельной электростанцией, газодизельная обеспечивает меньшие затраты на топливо, длительную непрерывную работу со стандартным топливным баком, возможность эффективного использования газа с различным химическим составом. Поэтому газодизель-генераторы находят достаточно широкое

применение в промышленности. Однако существенным недостатком, ограничивающим область применения газодизелей, является наличие колебания оборотов, которые обусловлены существенной нелинейностью газодизеля и изменением его параметров при изменении нагрузки [2, 3]. Это усложняет процесс синхронизации генераторов и распределения мощности между генераторами при параллельной работе. Поэтому решение задач автоматизации газодизельных установок с использованием современных цифровых систем, построение адекватных моделей, отражающих процессы в реальных электроэнергетических установках с газодизель-генераторными агрегатами, повышение качества электроэнергии, являются очень актуальными. В существующих моделях автономных электроэнергетических систем [4, 5] используются дизель-генераторные агрегаты, что ограничивает область применения этих моделей и не позволяет исследовать процессы в электроэнергетических системах в условиях низкого качества электроэнергии – при наличии колебаний частоты, характерных для газодизельных агрегатов, и всплесках/провалах напряжения, обусловленных коммутацией мощных потребителей электроэнергии.

Целью работы является разработка системы автоматической точной синхронизации генераторов в виде цифрового автомата и гибридной компьютерной модели автономной электроэнергетической системы для исследования процесса синхронизации генераторов в условиях значительных колебаний частоты, определение максимально возможных отклонений от допустимых условий синхронизации, а также создание программного обеспечения с использованием методов концептуального моделирования для мониторинга состояния и управления процессом синхронизации.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Синхронизация генераторов выполняется в случае наличия дефицита мощности, или при загруженности работающего генератора более 80% от номинальной мощности. Исследование процесса колебаний оборотов, результаты которого представлены в работе [3] с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса [2] показало, что наибольшие колебания оборотов газодизельных агрегатов наблюдаются в режиме холостого хода.

При увеличении нагрузки газодизель-генератора среднеквадратичное отклонение σ процесса колебаний оборотов уменьшается, и при загрузке газодизель-генераторного агрегата на 80% от номинальной мощности, колебания оборотов исчезают ($\sigma = 0$) [3]. Синхронизация генераторов (или генератора с сетью) происходит в случае, когда один из генераторов нагружен почти полностью, то есть колебания оборотов не наблюдается, а второй генератор работает в режиме холостого хода, и у него колебания частоты выходного напряжения вследствие нестабильности оборотов газодизельного агрегата являются максимальными.

В основу разработки модели положены следующие предпосылки:

- имеются в наличии динамические процессы (колебания частоты, коммутация нагрузки) – результаты эксперимента, которые должны быть повторены в компьютерной модели с инженерной точностью;
- компьютерная модель электроэнергетической установки и ее системы управления должна быть максимально простой.

Остальные особенности динамических процессов для решения поставленных задач определяющего значения не имеют. Поэтому зазоры и малые инерционности следует исключить из рассмотрения. Таким образом, компьютерная модель не должна копировать поведение всех конструктивных элементов, электромагнитные и тепловые процессы.

Система управления газодизель-генератором включает в себя следующие основные элементы:

- газодизель-генератор как объект управления;
- регуляторы, реализующие основные законы управления дизелем и возбуждением синхронного генератора;
- исполнительное устройство (актуатор), обеспечивающее перемещение рейки топливного насоса;
- нагрузка на дизель от генератора и собственные потери в дизеле;
- датчики частоты вращения дизеля и величины напряжения генератора.

На рис. 1 представлена компьютерная модель автономной электроэнергетической установки для исследования процесса автоматической точной синхронизации генераторов в условиях колебаний частоты.

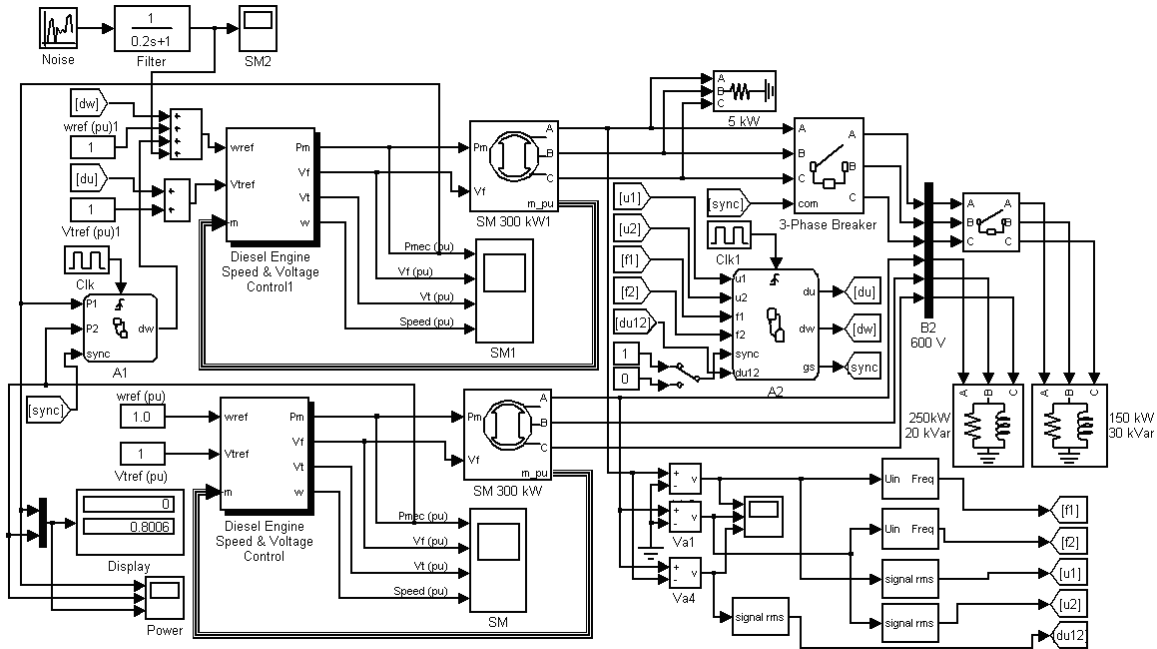


Рисунок 1 – Модель автономної електроенергетическої установки

Для моделирования процесса синхронизации в условиях колебаний частоты и коммутации нагрузки, а также исследования работы системы управления процессом синхронизации используется модель автономной электроэнергетической установки, состоящей из двух дизель-генераторов.

Задача имитации колебаний частоты оборотов газодизельного агрегата сводится к формированию случайного процесса, соответствующего реальному, который исследован в работе [3]. Эта задача решается в модели с помощью генератора белого шума Noise и формирующего фильтра Filter, и описывается выражением:

$$G_{\text{блш}}(\omega) = B_{\text{ш}}^2 |W_{\text{ф\phi}}(j\omega)|^2, \quad (1)$$

где $G_{\text{блш}}(\omega)$ – спектральная плотность искомого случайного процесса; $B_{\text{ш}}^2$ – дисперсия белого шума; $W_{\text{ф\phi}}(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи формирующего фильтра.

Таким образом, вид и числовые характеристики спектра имитируемой помехи определяются видом и числовыми характеристиками передаточной функции формирующего фильтра в выражении (1). Источник белого шума может быть создан с помощью алгорит-

мов формирования псевдослучайных последовательностей. В качестве фильтра может использоваться апериодическое звено первого порядка, передаточная характеристика которого имеет вид:

$$W(s) = \frac{k_0}{T_0 s + 1}, \quad (2)$$

где T_0 – постоянная времени интегрирования апериодического звена; k_0 – коэффициент пропорциональности.

Для реализации цифрового фильтра используя выражение (2) необходимо определить его дискретную передаточную функцию:

$$D(z) = \frac{x(z)}{\Theta(z)} = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{k_0}{1 + T_0 s} \right\} = \frac{bz^{-1}}{1 - az^{-1}}, \quad (3)$$

где $a = e^{-\frac{T}{T_0}}$, $b = k_0(1 - a)$, $x(z)$ – выходной сигнал фильтра; $\Theta(z)$ – входной сигнал фильтра; T – период дискретизации.

Исходными данными при практическом решении задачи являются среднее значение выбросов частоты f_b в течение определенного интервала времени за уровень f_n , среднее количество выбросов N_b за время T_b , длительность периода t_b отклонения частоты от номинальной, вероятность отклонения частоты в интервале

времени Δt . Среднюю частоту отклонений можно определить из выражения:

$$\bar{f}_B = \frac{a_x}{\sqrt{2\pi}} \varphi\left(\frac{f_0}{B_u}\right).$$

Увеличение значения средней частоты выбросов может быть достигнуто за счет формирования быстро осциллирующих процессов, что достигается благодаря уменьшению постоянной времени формирующего фильтра.

Таким образом, аддитивная случайная помеха формируется с помощью генератора белого шума, пропускаям полученного значения через формирующий фильтр и добавления возмущающего воздействия в сигнал управления.

На рис. 2 представлен цифровой автомат, реализующий алгоритм работы системы синхронизации генераторов. Входными сигналами цифрового автомата являются действующие значения напряжений работающего (u_2) и подключаемого (u_1) генератора, значения частот напряжений работающего (f_1) и подключаемого генератора (f_2), напряжение биений (du_{12}) и дискретный сигнал для запуска процесса синхронизации.

Выходными сигналами цифрового автомата являются сигнал на изменение напряжения возбуждения генератора (увеличить/уменьшить), сигнал на изменение оборотов приводного двигателя и сигнал на замыкание контактов автоматического выключателя.

Начальным состоянием автомата является состояние S_0 , в котором происходит инициализация внутренних переменных, необходимых для работы алгоритма. При наличии команды начала выполнения процесса синхронизации $sync$ автомат переходит в состояние SS_0 , которое состоит из двух подсостояний SS_1 (управление напряжением генератора) и SS_2 (управление оборотами дизеля), представляющих собой вложенные автоматы. Над состояниями SS_1 и SS_2 выполнена параллельная декомпозиция. При выполнении условий синхронизации автомат переходит в состояние SS_3 , в котором выполняется анализ производной разницы напряжений. Выдача сигнала на замыкание контактов автоматического выключателя (3-Phase Breaker) выполняется в момент времени, обеспечивающий минимальный бросок тока и провала напряжения.

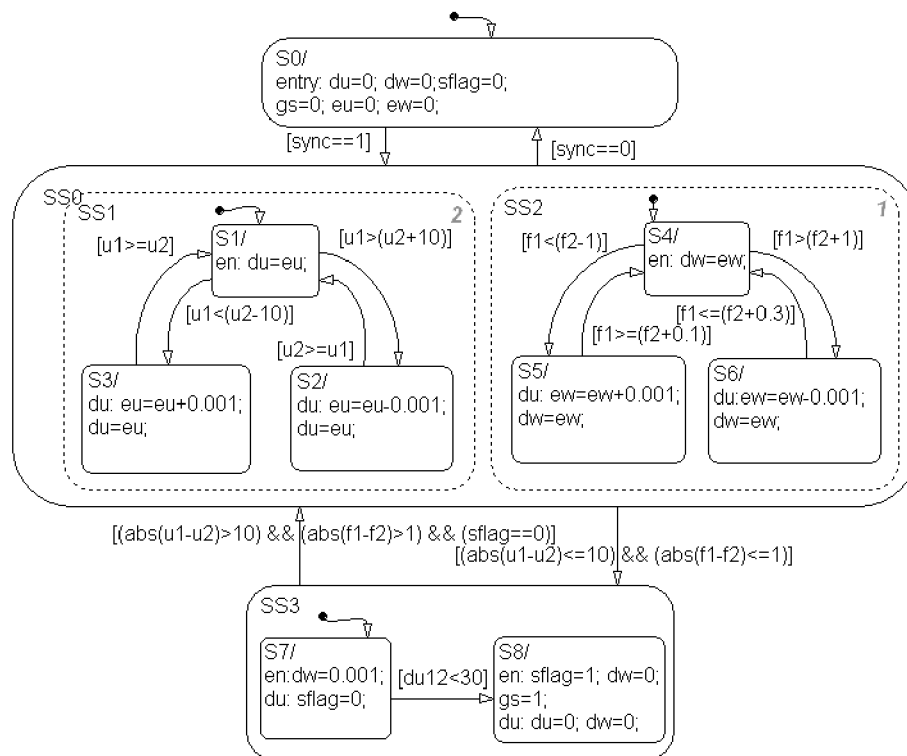


Рисунок 2 – Реализация системы синхронизации генераторов в виде цифрового автомата

Моделирование процесса синхронизации генераторов выполняется в условиях низкого качества электроэнергии, обусловленного нестабильностью оборотов приводного двигателя подключаемого генератора и наличием всплесков/провалов напряжения работающего генератора вследствие коммутации мощных потребителей электроэнергии. На рис. 3 представлены

осциллограммы действующего значения и частоты напряжения подключаемого генератора в процессе синхронизации при наличии возмущений. Замыкание контактов автоматического выключателя, выполняющего подключение генераторов на параллельную работу, происходит в момент времени $t=20$ с. Результаты представлены в относительных единицах.

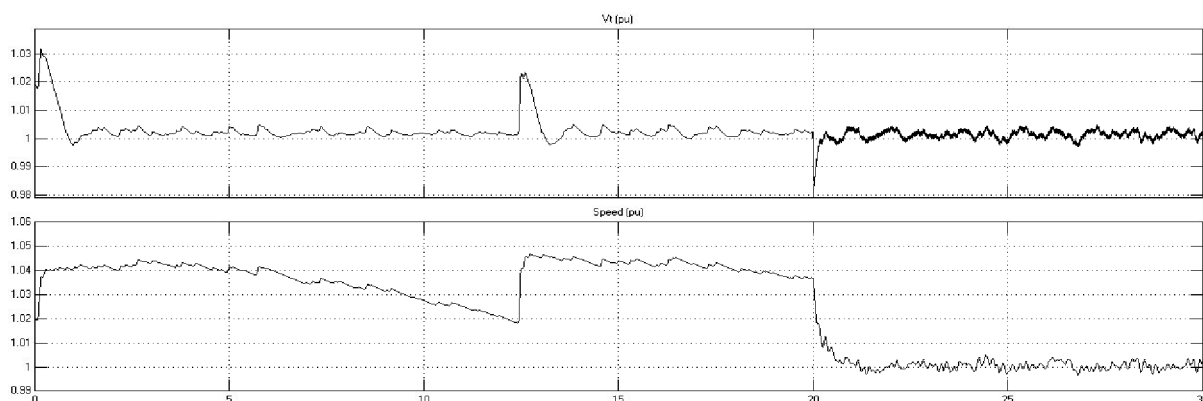


Рисунок 3 – Изменение напряжения и частоты подключаемого генератора в процессе синхронизации

Всплески и провалы напряжения, которые носят случайный характер, приводят к нарушению условий синхронизации и затягиванию процесса включения генераторов на параллельную работу.

В результате анализа экспериментальных данных, проведенного в работах [2, 3] установлено, что максимальная скорость изменения частоты в режиме холостого хода составляет 0,2 Гц/с. Допустимые условия, при которых можно выполнять синхронизацию генераторов – разница частот не более 1 Гц, разница напряжений не более 10% от номинального напряжения генераторов, и разность фаз не более 10° [5]. Анализ процесса синхронизации проведен для граничных условий. Разница напряжений генераторов в случае, когда их частоты различаются, представляет собой напряжение биения, и может быть описано выражением:

$$\begin{aligned} u_{\delta}(t) &= u_1(t) - u_2(t), \\ u_1(t) &= U_{d1} \sin(\omega_1 t), \\ u_2(t) &= U_{d2} \sin(\omega_2 t), \end{aligned} \quad (4)$$

где U_{d1} и U_{d2} – амплитудные значения напряжения первого и второго генератора, ω_1 и ω_2 – частоты напряжений первого и второго генератора соответствен-

но. Если в (4) $U_{d1}=U_{d2}=U$, то действующее значение напряжения биений изменяется по закону:

$$u_{\delta}(t) = 2U \sin \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t. \quad (5)$$

Экспериментальное исследование колебаний частоты, проведенное в работе [3], показало, что колебания частоты полностью отсутствуют у работающего на нагрузку генератора при его нагрузке 80% от номинальной, т.е. $d\omega_1/dt=0$. При наличии колебаний частоты подключаемого генератора выражение (5) примет вид:

$$u_{\delta}(t) = 2U \sin \frac{\omega_1 - \omega_2 \pm \frac{d\omega_2}{dt} t}{2} t. \quad (6)$$

Существующие системы синхронизации работают таким образом, что на основе анализа разницы частот напряжений генераторов выполняется расчет времени опережения формирования сигнала на автоматический выключатель так, чтобы с учетом времени срабатывания автоматического выключателя подключение генераторов на параллельную работу произошло при нулевой разности фаз. Однако после того, как сигнал на замыкание контактов автоматического выключателя будет сформирован, условия, при которых выполняется синхронизация, изменятся. Если в выражении (6) при-

нять максимально допустимую разность напряжений, при которой можно выполнять синхронизацию, равную 10% от номинальной (38 В), то в худшем случае эта разница составит 45,6 В, что является нарушением условий синхронизации. Для предотвращения нарушения условий синхронизации генераторов вследствие наличия колебаний оборотов, в алгоритме работы системы синхронизации нужно учитывать производную разности частот.

Основными исходными данными для системы алгоритмов управления процессом синхронизации генераторов является информация от управляемых объектов и внешних источников информации, например оператора. Автоматизированное рабочее место (АРМ)

$$S_{ГП} = \langle P, D, G, H_p, H_d, H_g, S_p, S_d, S_g, InD, InG, OutD, OutG \rangle,$$

где $P = \{p_i\}$ – множество процессов построения изображений и обработки информации; $D = \{d_i\}$ – множество информационных объектов; $G = \{g_i\}$ – множество графических объектов; H_p, H_d, H_g – устанавливают соответствие между отдельными объектами модели и множеством подчиненных им подобъектов; S_p, S_d, S_g – следование процессов, которые задают частичный порядок выполнения процессов; InD – входные информационные объекты процесса; InG – входные графические объекты процесса; $OutD$ – выходные информационные объекты процесса; $OutG$ – выходные графические объекты процесса.

К множеству процессов построения и обработки информации $P = \{p_i\}$ можно отнести функции высокого уровня, формирующие точечные изображения (растровые представления объектов, видимые контуры объектов и др.); аппроксимирующие к кусочно-линейным функциям (графические представления объектов, индикаторы и др.); функции обработки входящих данных; функции формирования управляющих пакетов; функции распределения процессов на исполняемые потоки и другие.

К множеству информационных объектов $D = \{d_i\}$ можно отнести пакеты поступающих данных; переменные и их структуры, ассоциированные с элементами

оператора для управления процессом синхронизации генераторов представлен в виде программного комплекса, решающего задачи сбора, обработки и отображения информации. Организация взаимодействия между средой моделирования и АРМ оператора может быть выполнена с использованием ОПС-сервера, или подхода, который подробно рассмотрен в работе [5].

При разработке графического интерфейса АРМ оператора использовались методы концептуального моделирования информационных процессов и интеллектуальных систем [6]. Общей концептуальной моделью графического интерфейса можно назвать следующий ряд процессов и объектов:

управления; промежуточные стеки данных, формируемые репорты передачи данных и другие.

Множество графических объектов $G = \{g_i\}$ представлено в виде ряда индикаторов (графические, стрелочные, шкальные, численные и др.), управляющих объектов (элементы ввода/вывода, индикации состояний, отображения строковых переменных и др.), видимой области системы мониторинга.

Одной из главных составляющих графической модели является концепция графических атрибутов. Наборы атрибутов описывают основные свойства графических объектов, такие как стиль линии, ее цвет, размеры контуров и цвет фона. Модель графических атрибутов может быть описана следующим рядом:

$$A_g = \langle C, F_c, N_c, T_c, n_c, t_c, InC, OutC \rangle,$$

где $C = \{c_i\}$ – множество графических атрибутов; F_c – графическое изображение; N_c, n_c – множество имен графических атрибутов; T_c, t_c – множество имен типов графических атрибутов; InC – процесс, запрашивающий значение атрибута; $OutC$ – процесс инициализации совокупности запрошенных атрибутов графического объекта. Подобным образом составляется модель графических ресурсов:

$$A_r = \langle R, F_r, N_r, T_r, n_r, t_r, InR, OutR, DelR \rangle,$$

где $R = \{r_i\}$ – множество графических ресурсов; $DelR$ – процедура отображения графического ресурса.

Интерфейс программных средств мониторинга и управления процессом синхронизации генераторов, разработанный с использованием методов концепту-

ального моделирования информационных процессов и интеллектуальных систем, представлен на рис. 4.

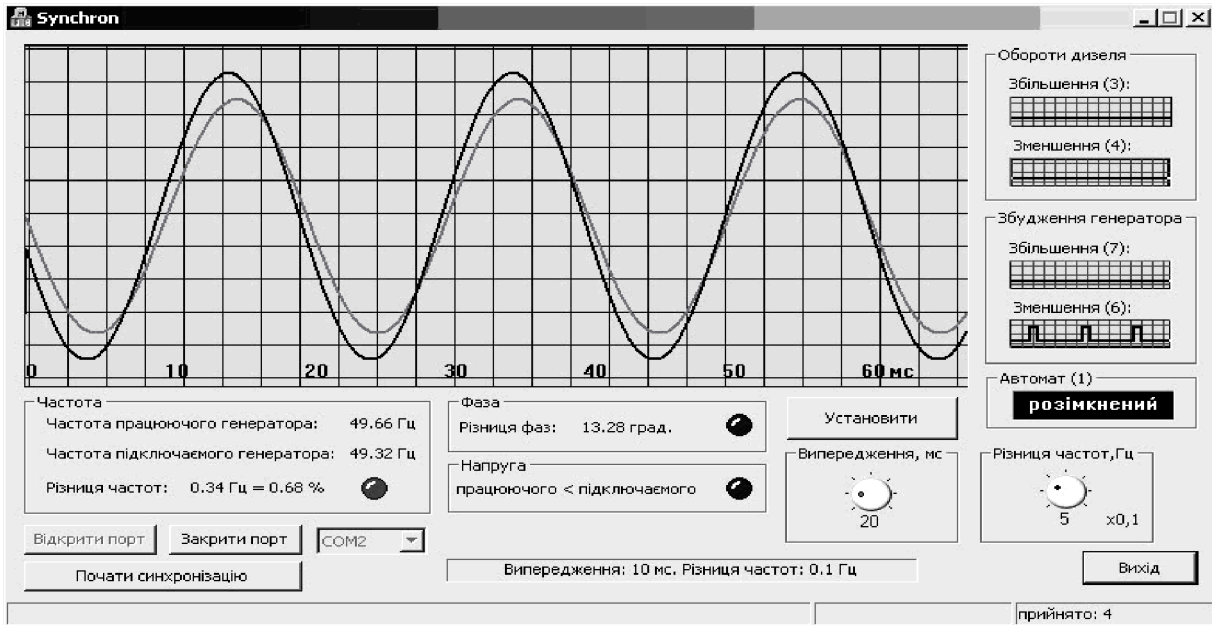


Рисунок 4 – Интерфейс АРМ оператора для контроля и управления процессом синхронизации генераторов

Элементы управления диалогового окна в удобной для оператора форме отображают следующие параметры:

- осциллограммы напряжений работающего генератора (сети) и подключаемого на параллельную работу генератора;
- частоты напряжений работающего генератора (сети) и подключаемого генератора;
- разницу частот напряжений генераторов;
- разницу фаз между напряжениями генераторов;
- значение допустимой разницы частот;
- значение времени опережения формирования сигнала на замыкание контактов автоматического выключателя.

Группа элементов отображения информации «Частота» содержит текстовые элементы для отображения значений частот работающего генератора и подключаемого на параллельную работу генератора. Группа графических элементов отображения «Обороты дизеля» позволяет оператору контролировать формирование импульсных сигналов управления оборотами дизельного агрегата. Группа графических элементов отображения «Возбуждение генератора» позволяет кон-

тролировать формирование импульсных сигналов управления возбуждением подключаемого генератора. Стилизованный элемент управления в виде регулятора позволяет установить значение времени опережения (в миллисекундах) на включение автомата, который подключает генераторы на параллельную работу.

ВЫВОДЫ

Разработанная модель автономной электроэнергетической системы и системы мониторинга позволила провести исследование процесса синхронизации генераторов в условиях низкого качества электроэнергии. Отличительной особенностью модели является то, что она позволяет моделировать случайные процессы колебаний частоты, полученные экспериментально на реальных газодизель-генераторных агрегатах. В созданной модели система синхронизации генераторов представлена в виде цифрового конечного автомата, т.е. модель является гибридной, что также является ее отличительной особенностью. Это позволило автоматизировать процесс реализации алгоритма синхронизации

ции на базе микропроцессорных средств с использованием технологии автоматного программирования.

Моделирование процесса синхронизации генераторов показало, что наличие колебаний оборотов газодизельного агрегата, которые являются причиной колебаний частоты напряжения, возможны изменения условий, при которых будет выполнено подключение генераторов на параллельную работу. Хотя эти изменения невелики, возможна ситуация, когда после формирования сигнала на замыкание автоматического выключателя условия синхронизации будут нарушены, что приведет к увеличению провала напряжения и

броска тока в момент подключения генераторов на параллельную работу. Для предотвращения нарушения условий синхронизации генераторов вследствие наличия колебаний оборотов, в алгоритме работы системы синхронизации нужно также учитывать производную разности частот, что вполне возможно при использовании микропроцессорных средств. Поиск улучшения качества управления следует искать на пути усложнения информационных структур систем управления (переходом к многоконтурным, каскадным схемам и схемам с компенсацией возмущений).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kolesov Ju.B. Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy /Ju.B. Kolesov, Ju.B. Senichenkov. – М.: BHV-Peterburg, 2006. – 224 s.
2. Rjaben'kij V.M. Avtomatizacija obrabotki rezul'tatov izmerenij naprjazhenija dlja identifikacii parametrov dizel'-generator /V.M. Rjaben'kij, A.O. Ushkarenko, V.I. Voskoboenko, Do An' Tuan //Zbirnik naukovih prac' NUK. – 2007. – №1 (412). – S.130-138.
3. Rjaben'kij V.M. Issledovanie avtokolebatel'nyh processov chastoty naprjazhenija gazodizel'-generatorov /V.M. Rjaben'kij, A.O. Ushkarenko, V.I. Voskoboenko //Sbornik nauchnyh trudov NUK – 2008. – №4. – S.113-118.
4. Yang T. Present situation and development of power sytem simulation technologies /T. Yang //Automation of Electric Power Systems. – China, 2002. – №17. – P.23-47.
5. Ushkarenko A.O. Monitoring i upravljenje jelektrojenergeticheskoj sistemoj s ispol'zovaniem MATLAB /A.O. Ushkarenko, Do An' Tuan, R.A. Spektorenko, K.V. Svetlinskij //Problemy informacionnyh tehnologij. – 2008. – №1 (003). – S.155-161.
6. Bogdanov D.V. Modeli i algoritmy konceptual'nogo proektirovanija avtomatizirovannyh sistem upravljenja /D.V. Bogdanov, E.B. Mazakov, O.B. Neilko, S.G. Chekinov. Pod. red. S.G. Chekinova. – М.: Kompanija Sputnik+, 2004. – 324 s

Рецензент: д.т.н., проф. Рожков С.А.,
Херсонская государственная морская академия.