



- [2] S. V. Shestopalov et al. "Optimizatsiya proizvoditelnosti protsessa peregruzki zerna v usloviyah ogranicheniya tipa «avariynaya situatsiya», XVIII Mizhnarod. konf. z avtomat. upravlinnya «Avtomatika–2011», Lviv, UA, 2011. pp. 194–195.
- [3] I. N. Kiryazov et al. "Avtomatizirovannaya sistema optimizatsii zagruzki potочно-transportnyh liniy peregruzki zerna: itogi proizvodstvennyih ispytaniy", *Hranenie i pererabotka zerna*. vol. 7, pp. 43–46, 2013.
- [4] B. S. Annaev et al. "Sposib kontrolyu zavantazhennya konveera", UA Patent 99525, May, 25, 2012.
- [5] B. S. Annaev et al. "Sposib avtomatichnogo upravlinnya zavantazhennyam potokovo-transportnoyi liniyi sipkih materialiv", UA Patent 95887, September, 12, 2011.

УДК 629.5.064.5.(045)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ

Шевченко В.А.

Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, Украина

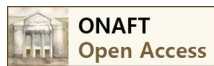
ORCID: 0000-0003-3229-1909

E-mail: [yash4891@gmail.com](mailto:yash4891@gmail.com)

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation technologies and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v10i4.1233

**Аннотация:** Процесс управления синхронизацией генераторов является одним из наиболее сложных процессов в судовых электроэнергетических установках. Разработке методов абстрактного и структурного синтеза устройств автоматической синхронизации с применением последних достижений электронной промышленности, а также синтезу алгоритмического обеспечения для программируемых систем уделяется недостаточно внимания. В работе предложено математическое и алгоритмическое описание процесса автоматической синхронизации дизель-генераторов в судовой электроэнергетической установке. Выделены три вида критериев оптимальности управления процессом синхронизации при детерминированной и стохастической постановке задачи. Определены риски отклонения фактической траектории синхронизируемого объекта от ожидаемой. Получена обобщенная структура управления процессом синхронизации и алгоритм функционирования системы управления этим процессом. Определена структурная схема канала подгонки частоты синхронизируемого дизель-генератора, а также описаны передаточные функции каждого ее звена. Определены математические выражения времени ожидания наступления момента синхронизма, а также параметров, определяющих задержку времени срабатывания генераторного автомата. Получена диаграмма, иллюстрирующая способ определения параметров синхронизации. Наглядное описание процесса при помощи алгоритмов, диаграмм и математических выражений позволит без труда реализовать предложенный способ в современных системах автоматического управления судовыми электроэнергетическими установками.

**Abstract:** Generators synchronization control process is one of the most complicate processes of the ship's electrical power plant. Automatic synchronization control devices development abstract and structure synthesis methods, programmable synchronization systems algorithms receives little attention. Diesel-generator automatic synchronization process mathematical and algorithmic description is proposed in the paper. It is selected three optimization criterions on synchronization process control in deterministic and stochastic task formulation. Synchronization object actual trajectory deviation from expected trajectory risks were defined. Synchronizing diesel-generator speed control structure diagram and such process control system algorithm were received. Synchronizing diesel-generator channel structure diagram and it's all transfer functions were defined. Synchronism moment expectation time and generator's circuit breaker closing time delay mathematical expressions were defined. Synchronization parameters defining diagram is presented in paper. Synchronization



*process easy algorithmic description, diagrams and mathematical expressions will allow to realize proposed method in modern electrical power plants control systems without any difficulties.*

**Ключевые слова:** Синхронизация генераторов, дуальное управление, адаптивная система, подгонка частоты, алгоритмы управления.

**Keywords:** Generators synchronization, dual control, adoptive system, speed control, control algorithms.

---

### **Введение**

Синхронизация генераторных агрегатов (ГА) относится к наиболее сложным и весьма ответственным процессам управления в электроэнергетике судов. Поэтому исследованию свойств этого процесса и совершенствованию технических средств автоматизации уделяется особое внимание.

Наряду с этим неоправданно мало внимания уделяется разработке методов абстрактного и структурного синтеза устройств автоматической синхронизации с применением последних достижений электронной промышленности, а также синтезу алгоритмического обеспечения для программируемых систем. В лучшем случае авторы [1,2] приводят описание принципа действия узлов некоторых типовых синхронизаторов или алгоритмы управления в самом общем виде.

В связи с этим встает задача анализа существующих способов автоматизации процесса синхронизации для установления математических моделей основных преобразователей и исследования их с позиции реализации в микропроцессорных системах. При этом необходимо стремиться к максимальному использованию положительных свойств жесткой (аппаратурной) и программируемой логики с позиций таких критериев как надежность, точность, быстродействие, диагностируемость.

### **Анализ литературных данных и постановка проблемы**

К настоящему времени опубликовано ряд фундаментальных работ [3-5], охватывающих математические методы исследования и проектирования электроэнергетических систем со статической динамикой и переменной структурной схемой.

Ряд работ [6-8] посвящено разработке и оптимизации режимов работы СЭЭС, где отмечена необходимость исследований в части совершенствования не только главной управляющей системы верхнего уровня, но и локальных подсистем управления вало- и дизель-генераторами.

Совершенствование алгоритмического обеспечения в комбинации с использованием современной цифровой техники в судовой электроэнергетике дает большие возможности в развитии автоматизации процессов управления, контроля и защиты особенно на судах с комбинированными и гибридными электрическими пропульсивными комплексами [9-11], а также на судах с системами динамического позиционирования [12,13], где электроэнергетическая система зачастую неразрывно связана с электрическим пропульсивным комплексом. Больших преимуществ в плане повышения технико-экономических показателей СЭС можно добиться управлением соотношения собственных параметров ДГ [14], решая задачи, связанные с обеспечением минимума расхода топлива и износа отдельных деталей, снижением интенсивности нагарообразования и др. Целесообразной также является оптимизация работы АСУ СЭЭС в части повышения быстродействия измерения и диагностики электрических параметров [15] с целью своевременной ее адаптации и реконфигурации.

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является поиск метода оптимального управления процессом синхронизации дизель-генераторов при детерминированной постановке задачи в судовых электроэнергетических установках.

### **Методы и материалы исследования**

Задачу оптимизации свяжем с определением такого закона управления, который удовлетворял бы некоторому условию экстремума, являющемуся показателем качества (или показателем достижимости поставленной цели), и учитывал бы требования по ограничению управляющих воздействий, качеству электроэнергии, а также возможные изменения (в процессе эксплуатации) технических характеристик синхронизируемых объектов. Последнее требование вызывает необходимость рассмотрения разрабатываемой системы в классе адаптивных (самонастраивающихся) систем управления.

Поскольку процесс синхронизации является сложной и многокритериальной задачей, то ее решение целесообразно расчленить на составные этапы, каждый из которых необходимо рассматривать независимо как решение отдельной части задачи. Для оценки частной задачи может быть выбран один критерий, если задача простая и малая по объему, и группа критериев, если задача комплексная. При этом один из группы критериев выбирается в качестве основного, а остальные являются дополнительными и в условиях их взаимного антагонизма могут иметь приоритетную основу. При решении частных задач может быть произведена смена основного и дополнительного критериев или изменение приоритета и степени важности дополнительных критериев в зависимости от требований к быстродействию, реальной обстановки, вида предписанного управления и других факторов, влияющих на протекание процесса синхронизации.



Определенные автором в [16] задачи синхронизации можно условно разделить на задачи быстрогодействия, т.е. задачи выполнения управления в кратчайший срок, задачи управления в предписанное (заданное) время и задачи управления в предписанных условиях. Таким образом, исходя из смыслового содержания задач управления, запишем три вида критериев оптимальности: для задач быстрогодействия

$$K = \min_u T, \quad (1)$$

где  $T$  – время управления;  $u$  – управление синхронизируемым объектом; для задач управления в заданное время

$$K = \min(T_{\text{зад}} - T_{\text{факт}}), \quad (2)$$

где  $T_{\text{зад}}$  – заданное (предписанное) время требуемого управления,  $T_{\text{факт}}$  – фактическое время, затраченное на выполнение управления;

и для задач управления в заданных условиях

$$K = \min|\Delta\Pi_{\text{доп}} - \Delta\Pi_{\text{факт}}|, \quad (3)$$

где  $\Delta\Pi$  – допустимая величина отклонения параметра  $\Pi_i$  от  $\Pi_{\text{доп}}$ ;  $\Delta\Pi_{\text{факт}}$  – фактическое отклонение  $\Pi_i$  от  $\Pi_{\text{доп}}$ .

В соответствии с рассматриваемыми постановками задач управления синхронизируемыми объектами – детерминированной и стохастической – введем критерии оптимальности.

Наиболее востребованной является задача управления в детерминированной постановке, базирующаяся на том, что управление синхронизируемыми объектами, а значит и траектории их движения в пространстве задаются известными функциями времени. Частный случай такой постановки допускает, что кривые напряжения сети  $U_{os}$ , как объекта синхронизма, и генератора  $U_{sy}$ , как синхронизируемого объекта, представляют собой синусоидальные функции времени соответственно.

Критерии оптимальности задач синхронизации в детерминированной постановке полностью описываются зависимостями (1-3).

Поскольку в решении задач точной синхронизации определяющими являются условия (3), то для оценки эффективности управления данным процессом положим в основу определения  $\Delta\Pi_{\text{доп}}$  и  $\Delta\Pi_{\text{факт}}$  тройки параметров  $D=(\Delta U_{\text{доп}}, \omega_{\text{доп}}, \alpha_{\text{доп}})$  и  $\Phi=(\Delta U, \omega_s, \alpha)$ , соответственно. В целом, учитывая, что превышение любого из параметров тройки  $\Phi$  соответствующего допуска из  $D$  приводит к возникновению существенного уравнивающего тока в процессе синхронизации, поставим разность  $(\Delta\Pi_{\text{доп}} - \Delta\Pi_{\text{факт}})$  в соответствие функционалу

$$i_{\text{ур}} = -\frac{\sqrt{2} K E'_d E''_d}{x''_{d1} + x''_{d2} + x_c} \sin \frac{\alpha_0}{2},$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока;  $x''_{d1}$  и  $x''_{d2}$  – сверхпереходные индуктивные сопротивления по продольной оси синхронизируемых генераторов;  $x_c$  – эквивалентное индуктивное сопротивление элементов сети, соединяющих синхронизируемые генераторы;  $\alpha_0$  – начальный угол сдвига фаз между продольными ЭДС синхронизируемых генераторов, т.е. между  $E''_{d1}$  и  $E''_{d2}$ .

Таким образом, основной критерий оценки эффективности управления процессом синхронизации будет иметь вид:

$$K = \min_u i_{\text{ур}}$$

Применив полученные ранее выражения к каждому из двух типов задач оценки эффективности, получим две группы критериев оптимальности:

для первого типа задач

$$K = \min_u (P(t)) \quad \text{– по быстродействию};$$

$$K = \min_u (P(T_{\text{зад}} - T_{\text{факт}})) \quad \text{– по выполнению в заданное время};$$

$$K = \min_u (P(\Pi_{\text{зад}} - \Pi_{\text{факт}})) \quad \text{– по выполнению с заданной точностью};$$

и для второго типа задач;

$$K = \min_u (M(T)) \quad \text{– по быстродействию};$$

$$K = \min_u (M(T_{\text{зад}} - T_{\text{факт}})) \quad \text{– по выполнению в заданное время};$$

$$K = \min_u (M(\Delta\Pi_{\text{доп}} - \Delta\Pi_{\text{факт}})) \quad \text{– по выполнению с заданной точностью}.$$

Первую группу критериев будем применять для оценки качества функционирования системы при стохастическом подходе к определению момента оптимума синхронизации.

Вторую группу критериев будем использовать для оценки системы при управлении процессом уравнивания частот синхронизируемых объектов и определении момента подачи опережающего импульса на включение генераторного автомата. Если при этом поставить требование, в соответствии с которым СУ при формировании управляющих воздействий должна учитывать изменение технических характеристик объектов управления в процессе эксплуатации, то данные задачи следует решать на базе теории дуального управления [16].



Синтез алгоритма оптимального управления в теории дуального управления для частного случая, под который попадают две последние задачи, сведем к следующему. Предположим, что известна математическая модель (либо существуют экспериментальные данные) описывающая с дискретностью  $\tau$  изменение величины  $X(i,j) \in X(N_{x1} - N_m)$  в процессе перевода –  $P_x$  синхронизируемого объекта из одного – начального в другое – заданное конечное состояние, т.е.

$$\cup_X (X_H, \theta, Z, P_X, \tau) \rightarrow X_3 \quad (4)$$

где,  $\cup_X$  – результатная функция перевода по величине  $X_H(\tau)$ ;  $X(\tau)$  – управляемая величина;  $X_H(\tau)$  – ее значение в момент появления управляющего воздействия;  $\theta(\tau)$  и  $Z(\tau)$  – изменения технико-эксплуатационных показателей синхронизируемого объекта в процессе эксплуатации.

При этом, в процессе реализации любого из переводов типа  $X_H - P_x \rightarrow X_3$  в любой,  $k$ -й момент времени управляющей системе известны предписанное –  $X_k(\tau)$  и фактическое –  $X_k^\Phi(\tau)$  значения управляемой величины. Дополнительная информация о величине  $Z(\tau)$  содержится в векторе наблюдений  $V_{k-1}=(V_{k-1}, V_{k-2}, \dots, V_H)$  величины  $X(\tau)$  в предшествующие моменты времени в векторе управлений  $\theta_{k-1}=(\theta_{k-1}, \theta_{k-2}, \dots, \theta_H)$ , которые регистрируются в памяти МП СУ и представляют собой наблюдаемую предысторию управляемого процесса. Здесь  $V_i = X_i + h_i, i \in \overline{0, k-1}$ , где  $h_i$  – случайная погрешность измерения величины  $X_i$  с известной плотностью распределения вероятностей  $P(h_i)$ .

Если наблюдения за реализуемым переводом показывают, что существует отклонение фактического  $X_k^\Phi(\tau)$  значения управляемой величины от предписанного –  $X_k^\Pi(\tau)$ , то потери, вносимые системой, можно оценить удельной функцией потерь

$$W_k(\tau) = W(X_k^\Phi, X_k^\Pi, \tau)$$

Вполне очевидно, что за конечное время функционирования МП СУ в процессе перевода –  $n\tau$  обобщенная функция потерь будет иметь вид:

$$W = \sum_{k=0}^n W(X_k^\Phi, X_k^\Pi, \tau)$$

Таким образом, систему будем считать оптимальной, для которой полный риск  $R$  – математическое ожидание функции потерь – минимален, т.е.

$$M\{W\} = \sum_{k=0}^n M\{W_k\} = \sum_{k=0}^n R_k \rightarrow \min R \quad (5)$$

Здесь  $R_k$  – удельный риск, который определяют как

$$R_k = \int_{\psi(V_{k-1}, \theta_{k-1})} r_k P(V_{k-1}, \theta_{k-1}) d\psi \quad (6)$$

Функционал  $r_k$  в (6), называемый условным удельным риском, представляет собой математическое ожидание удельных потерь  $W_k$  при фиксированных значениях векторов  $V_{k-1}$  и  $\theta_{k-1}$ . Он определяется в виде:

$$Z_k = \int_{\psi(Z, \theta_k)} W(X_k^\Phi(\theta_k, Z) X_k^\Pi) P(Z/V_{k-1}, \theta_{k-1}) \Gamma_k d\psi, \quad (7)$$

где  $\Gamma_k = P(\theta_k/V_{k-1}, \theta_{k-1})$  – условная плотность распределения  $\theta_k$ , называемая удельной стратегией управления.

В (6) и (7) символом  $\psi$  обозначена область интегрирования. Выражение  $P(Z/V_{k-1}, \theta_{k-1})$  представляет собой апостериорную плотность распределения неизвестного параметра  $Z$  и при заданных априорных плотностях  $P_0(Z)$  и  $P(h_i)$  находится по формуле Байеса:

$$P(Z/V_{k-1}, \theta_{k-1}) = \frac{P_0(Z) \prod_{i=0}^{k-1} P(V_i/Z, \theta_i) \prod_{i=0}^{k-1} \Gamma_i}{P(V_{k-1}, \theta_{k-1})}. \quad (8)$$

Условная плотность распределения  $P(V_i/Z, \theta_i)$  определяется с учетом (4) по известной плотности распределения  $P(h_i)$ . Последовательность функций при  $\delta = \{\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_n\}$  принято называть стратегией управления. Зависимость риска  $R$  от стратегии  $\delta$  обозначим  $R^\delta$  и будем считать оптимальной, если она минимизирует риск  $R$ .

Эта стратегия ищется в классе допустимых стратегий  $\Delta$ . Из (6-8) следует, что каждое слагаемое  $R_k$  в (5) зависит от выбора последовательности  $\{\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_n\}$ . При этом выбор удельной стратегии  $\Gamma_k$  влияет не только на  $R_k$  в  $k$ -ый момент времени, но и на значения всех будущих удельных рисков  $R_{k+1}, \dots, R_n$ . Это влияние проявляется, как следует из (8), через апостериорную плотность распределения неизвестного параметра и составляет сущность дуальности

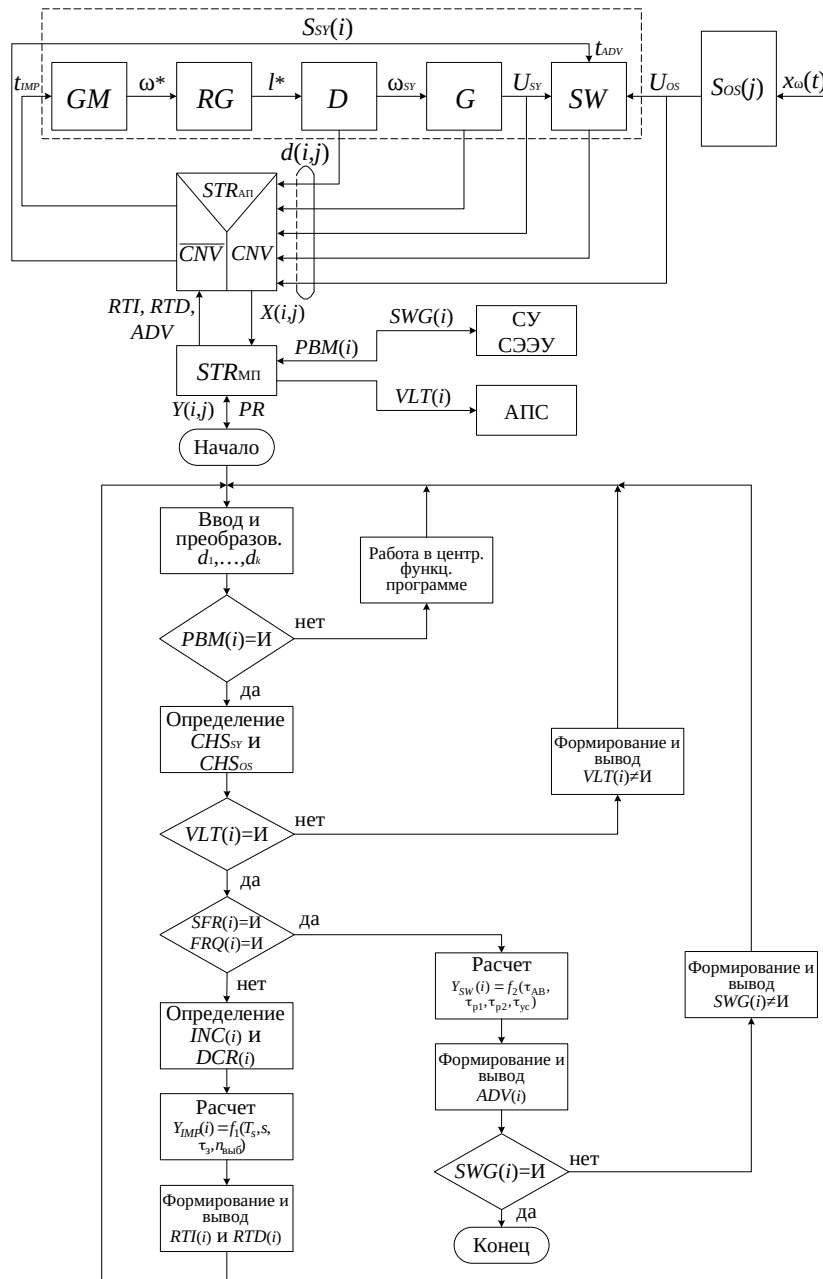


управления: выбор управления определяет не только поведение величины  $X$ , но и темп накопления информации об изменении  $Z$ .

**Результаты исследования**

В связи с вышеизложенным, оптимальная стратегия управления процессом синхронизации, в частности уравнивания частот синхронизируемых объектов и определения момента подачи опережающего импульса на включение генераторного автомата, будет связана с разработкой эффективных способов измерения технических показателей объектов управления и определения их изменений в процессе эксплуатации.

Если теперь, полученные выше результаты, а также полученные автором в работе [16] обобщить и формализовать с учетом выбранной стратегии управления, то структура оптимального управления процессом синхронизации будет иметь вид, рис. 1.



**Рис. 1 – Обобщенная структура управления процессом синхронизации**

Выделим в структуре, рис. 1, канал управления подгонкой частоты и представим его эквивалентной схемой цифровой автоматической системы управления с сигналом  $\omega_{СВ}$  (рис. 2), в которой МП система выполняет роль дискретного автоматического управляющего устройства, работающего циклически, с интервалом обновления информации  $\tau = T_{Ц}$ .



Детерминированная постановка задачи позволяет рассматривать управляющее устройство, как элемент непрерывного действия, закон функционирования которого можно описать математически. В общем случае это будет зависимость вида

$$t_{IMP} = \frac{\omega^*}{W_{CR}(p)},$$

где  $W_{CR}(p)$  – передаточная функция цепи подгонки.

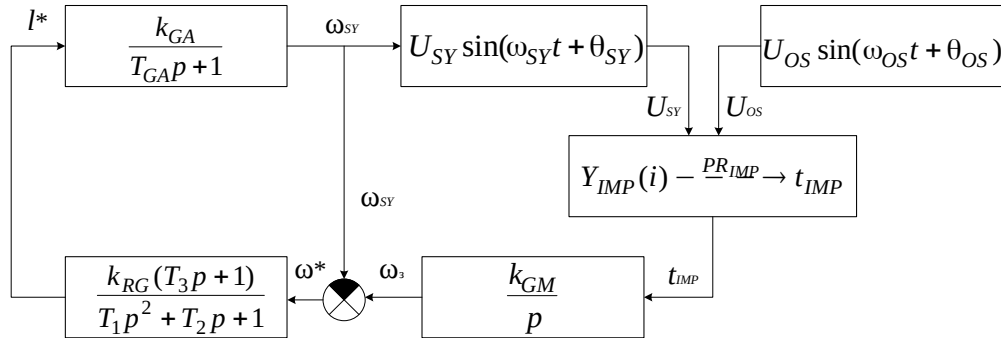


Рис. 2 – Структурная схема канала подгонки частоты

Как видно из структуры рис. 2,

$$W_{CR}(p) = W_{GM}(p) \cdot W_{RG}(p) \cdot W_{GA}(p) = \frac{k_{GM}}{p} \cdot \frac{k_{RG}(T_3 p + 1)}{T_1 p^2 + T_2 p + 1} \cdot \frac{k_{GA}}{T_{GA} p + 1};$$

$$W_{CR}(p) = \frac{k_{GM} k_{RG} k_{GA} (T_3 p + 1)}{T_1 T_{GA} p^4 + (T_2 T_{GA} + T_1) p^3 + (T_2 + T_{GA}) p^2 + p}.$$

Таким образом, выражение

$$\omega^* = \left[ \frac{k_{GM} \cdot k_{RG} \cdot k_{GA} (T_3 p + 1)}{T_1 T_{GA} p^4 + (T_2 T_{GA} + T_1) p^3 + (T_2 + T_{GA}) p^2 + p} \right] t_{IMP}$$

будет описывать реальный переходной процесс, вызванный реализацией в цепи подгонки управляющего воздействия  $t_{IMP}$ , а обратная зависимость

$$t_{IMP} = \frac{\omega^*}{\left[ \frac{k_{GM} \cdot k_{RG} \cdot k_{GA} (T_3 p + 1)}{T_1 T_{GA} p^4 + (T_2 T_{GA} + T_1) p^3 + (T_2 + T_{GA}) p^2 + p} \right]}$$

может быть положена в основу искомого управления.

Такой подход к расчету  $t_{IMP}$  позволяет учитывать все возможные в процессе эксплуатации ЭЭУ изменения величин  $k_{GM}$ ,  $k_{RG}$ ,  $k_{GA}$ ,  $T_{GA}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , характеризующих динамические свойства цепи:  $GM \rightarrow RG \rightarrow GA$ . Однако реализация в МП системах зависимости вида

$$t_{IMP} = F_1(\omega^*, T_{GA}, T_1, T_2, T_3, k_{RG}, k_{GM}, k_{GA})$$

крайне затруднена из-за сложности, а зачастую, и невозможности достоверного определения параметров  $T_{GA}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $k_{RG}$ ,  $k_{GM}$  и  $k_{GA}$  в реальных ЭЭУ.

По этой причине полином  $W_{CR}(p)$  заменим тройкой характеристик  $B=(s, \tau_3, n_{выб})$ , что позволяет описать искомым закон управления зависимостью вида

$$t_{IMP} = F_2(\omega_s, \tau_3, s, n_{выб}),$$

где  $s$  – темп изменения частоты вращения  $GA$ ,  $\tau_3$  – запаздывание по каналу управления частотой вращения,  $n_{выб}$  – выбег по частоте вращения при снятии управляющего воздействия  $t_{IMP}$ .



Определение оптимального момента включения генераторного автомата синхронизируемого объекта связано с решением совокупности задач, таких как: определение взаимного расположения в пространстве векторов одноименных фаз напряжений синхронизируемых объектов; расчет времени ожидания  $t_{ож}$  оптимума синхронизации, т.е. момента геометрического совпадения названных векторов, формирование опережающего импульса на включение генераторного автомата синхронизируемого объекта.

В соответствии с детерминированной постановкой задачи взаимное расположение в пространстве векторов одноименных фаз напряжений синхронизируемых объектов может быть описано выражением

$$\vec{r}_{SY}^{-(k)} = \vec{r}_{OS}^{-(k)} + \Delta \vec{r}_S^{-(k)},$$

где

$$\Delta \vec{r}_S^{-(k)} = \vec{r}_S^{-(k)} - \vec{r}_S^{-(0)} = [t^{(k)} - t^{(0)}] \frac{d\omega_S^{(k)}}{dt} \approx |\Delta u_S^{(k)}| = U_{OS} U_{SY} \sin \frac{\omega_S}{2} [t^{(k)} - t^{(0)}]$$

– вектор, определяющий изменение величины напряжения огибающей биений за время  $[t^{(k)} - t^{(0)}]$ .

Поскольку вектор  $\vec{r}_S^{-(k)} = \vec{r}_{SY}^{-(k)} \cdot \vec{r}_{OS}^{-(k)} \cdot \sin \frac{\alpha^{(k)}}{2}$ , а также, учитывая, что  $\vec{r}_S^{-(0)} = 0$  и случай, когда  $\frac{d\omega_S}{dt} = 0$  (режим зависания), по условию задачи выпадает из рассмотрения, получим:

$$\vec{r}_{SY}^{-(k)} \vec{r}_{OS}^{-(k)} \cdot \sin \frac{\alpha^{(k)}}{2} \approx U_{SY} U_{OS} \sin \frac{\omega_S}{2} [t^{(k)} - t^{(0)}],$$

откуда

$$\alpha^{(k)} \approx \omega_S [t^{(k)} - t^{(0)}]$$

либо

10.15673/atbp.v10i4.1233

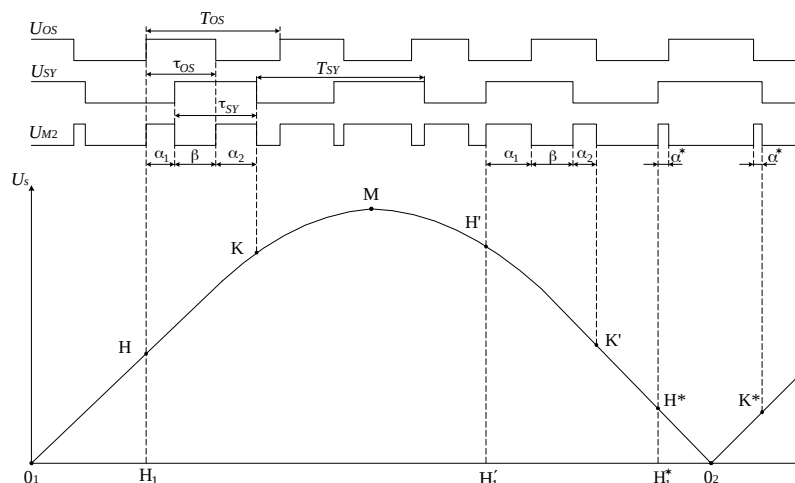
$$[t^{(k)} - t^{(0)}] \approx t_{ож} = \frac{\alpha^{(k)}}{\omega_S} \tag{9}$$

Таким образом, определена зависимость величины  $t_{ож}$  от текущих значений  $\omega_S$  и  $\alpha$ , что позволяет приступить к разработке соответствующего математического обеспечения МП СУ СЭЭУ с учетом ее возможностей и принятых способов измерения.

Поскольку МП система относится к классу цифровых систем, то в основу способа измерения величин  $\omega_S$  и  $\alpha$  положим принцип счета количества временных интервалов за периоды синусоидальных напряжений  $U_{SY}$ ,  $U_{OS}$ , за интервал времени, характеризующий разность фаз.

Условимся так же, что МП система содержит необходимые формирователи цифровых сигналов, отображающих последовательности периодов напряжений синхронизируемых объектов ( $T_{SY} = \frac{1}{f_{SY}}$ ) и ( $T_{OS} = \frac{1}{f_{OS}}$ ), рис. 3, а также логическое устройство сложения цифровых сигналов, позволяющее определить измерение угла  $\alpha$  на временном интервале  $T_S$ , который полностью соответствует периоду огибающей биений

$$u_S = 2U_m \sin \frac{\omega_S}{2} t \text{ при } U_{SY} = U_{OS} = U_m$$



**Рис. 3 – Диаграмма, иллюстрирующая способ определения параметров синхронизации**

Основной трудностью, с которой приходится сталкиваться при разработке математического обеспечения микропроцессорных устройств управления синхронизацией ГА, является получение расчетного выражения для величины времени  $t_{ож}$  от начала измерения (И) угла  $\alpha$  до точки оптимума  $\theta_2$ . Связано это с тем, что в течение  $T_S$  значения углов  $\alpha$  на симметричных участках  $O_1M$  и  $MO_2$  попарно совпадают. Поэтому использование зависимости (9) для определения времени  $t_{ож}$  будет справедливо только на участке  $MO_2$ :

$$t_{ож} = \frac{\alpha}{\omega_S} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot T_S.$$

Оценивая пути решения данной задачи, остановимся на идее измерения двух последовательных значений угла  $\alpha$  с дальнейшей оценкой знака их разности. При этом можно установить следующее: если  $\alpha_1 < \alpha_2$ , то процесс измерения  $\alpha$  проводится на участке  $O_1M$ , при  $\alpha_1 > \alpha_2$  – на участке  $MO_2$ .

Однако в случаях полного наложения временных интервалов  $\tau_i$  и  $\tau_j$  отмеченная закономерность может быть нарушена, что приведет к ошибке в определении знака.

Как видно из рис. 3, для данного случая значения  $\alpha$  считаются минимальными ( $\alpha^*$ ) и всегда будут меньше  $\Delta T = |T_{OS} - T_{SY}|$ . Поэтому для исключения возможных ошибок измеряемые значения необходимо проверять по условию  $\alpha > \Delta T$ .

Таким образом, можно записать следующие выражения для определения искомого параметра  $t_{ож}$ :

$$t_{ож} = \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right) T_S, \text{ если } \alpha_1 < \alpha_2$$

и

$$t_{ож} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot T_S, \text{ если } \alpha_1 > \alpha_2$$

либо учитывая, что  $T_S = \frac{T_{SY} T_{OS}}{|T_{SY} - T_{OS}|}$ ,  $T_{OS} = 2\tau(j)$  и  $T_{SY} = 2\tau_{SY}$ ,

получим в окончательном виде выражения, необходимые для решения поставленной задачи предложенным методом.

$$t_{ож} = \left(2 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \cdot \frac{\tau_{OS} \cdot \tau_{SY}}{\tau_{OS} - \tau_{SY}}, \text{ если } \alpha_1 < \alpha_2$$

$$t_{ож} = \frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{\tau_{OS} \cdot \tau_{SY}}{\tau_{OS} - \tau_{SY}}, \text{ если } \alpha_1 > \alpha_2$$

При таком подходе к определению  $t_{ож}$  величину задержки времени  $\tau_{ADV}$  на подачу опережающего импульса включения генераторного автомата можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{ADV} = t_{ож} - t_{ср.ц}, \quad (10)$$

где  $t_{ср.ц}$  – время срабатывания элементов канала включения генераторного автомата.

Как видно из выражения (10), точность подключения синхронизируемого объекта к объекту синхронизма зависит не только от точности измерения величин  $\alpha$  и  $\omega_S$  и расчета  $t_{ож}$ , но и от достоверности текущего значения величины  $t_{ср.ц}$ .

В [16] показано, что  $t_{ср.ц} \cong Y_{SW}(i) = f_2(\tau_{AB}, \tau_{p1}, \tau_{p2}, \tau_{yc})$ , где  $\tau_{yc}, \tau_{p1}, \tau_{p2}$  и  $\tau_{AB}$  – собственное время срабатывания основных элементов канала включения генераторного автомата, соответственно: управляющей системы ( $\tau_{yc}$ ), реле гальванической развязки ( $\tau_{p1}$ ), промежуточного реле ( $\tau_{p2}$ ) и автоматического выключателя генератора ( $\tau_{AB}$ ), поэтому для  $t_{ср.ц}$  можно записать

$$t_{ср.ц}(i) = \tau_{AB}(i) + \tau_M(i) + \tau_{p2}(i) + \tau_{yc}(i).$$

В процессе эксплуатации судовой ЭЭУ, по мере выработки ресурса управляющей системы, аппаратуры сопряжения и автоматического выключателя, их временные показатели  $\tau_{yc}, \tau_{p1}, \tau_{p2}, \tau_{AB}$  – изменяются, что приводит к существенным изменениям  $t_{ср.ц}$  и, как следствие, к ошибкам в расчете  $t_{ср.ц}$ . Поскольку при этом большую достоверность имеют последние  $k$  – включений из  $n$ , предшествующие расчету величины  $t_{ср.ц}(n+1)$ , то для определения последней можно воспользоваться формулой



$$t_{\text{ср.ц}}(n+1) = \frac{\sum_{i=n-k}^n (\tau_{\text{AB}}(i) + \tau_{\text{p1}}(i) + \tau_{\text{p2}}(i) + \tau_{\text{yc}}(i))}{k}$$

### Обсуждение результатов

Таким образом, получены математические выражения, лежащие в основе определения оптимального момента включения генераторного автомата синхронизируемого объекта в условиях детерминированной постановки задач управления процессом синхронизации.

Предложенный способ управления процессом синхронизации позволит его оптимизировать по ряду таких критериев, как: быстрдействие, выполнение в заданное время, выполнение с заданной точностью.

Наглядное описание процесса при помощи алгоритмов, диаграмм и математических выражений позволит без труда реализовать предложенный способ в современных системах автоматического управления судовыми электроэнергетическими установками.

### Выводы

В работе предложено математическое и алгоритмическое описание процесса автоматической синхронизации дизель-генераторов в судовой электроэнергетической установке. Выделены три вида критериев оптимальности управления процессом синхронизации при детерминированной и стохастической постановке задачи. Определены риски отклонения фактической траектории синхронизируемого объекта от ожидаемой.

Получена обобщенная структура управления процессом синхронизации и алгоритм функционирования системы управления этим процессом. Определена структурная схема канала подгонки частоты синхронизируемого дизель-генератора, а также описаны передаточные функции каждого ее звена.

Определены математические выражения времени ожидания наступления момента синхронизма, а также параметров, определяющих задержку времени срабатывания генераторного автомата. Получена диаграмма, иллюстрирующая способ определения параметров синхронизации.

### Список использованных источников

- [1] Emam, S.E.A., Automatic digital synchronization, International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering, ICEEC'04, (2004). p. 778-784.
- [2] Çolak, ø., Bayındır, R., Sefa, ø., Demirbaú, ù., Bal, G., Developing of a control unit for the parallel operation of AC generators, TPE'06 3rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, (2006). p. 134-137.
- [3] Шевченко В. А. Верификация функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В. А. Шевченко // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб., 2015, Вып. 21, с. 70-76.
- [4] Захарченко В. Н. Решение задач управления судовой электроэнергетической установкой при изменении нагрузки / В. Н. Захарченко, В. А. Шевченко // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб., 2015, Вып. 36, с. 74-82.
- [5] Шевченко В. А. Способ верификации функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В. А. Шевченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науч. -техн. сб., 2015, Вып. 1, с. 296-301.
- [6] Clarke, N.J. (2004), Marine electrical power systems, 2nd Intern. Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2004 (PEMD 2004)
- [7] Fossen, T.I. (2002), Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics AS, Trondheim, Norway
- [8] Milosevic, M and G. Andersson (2005), Generation Control in Small Isolated Power Systems, North American Power Symposium (NAPS), Ames, USA, 2005
- [9] Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi:[10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543).
- [10] Budashko, V. V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №2. – P. 62 – 72. Doi:[10.20998/2074-272X.2017.2.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.10).
- [11] Budashko, V. V. Conceptualization of research of power hybrid electric power complexes [Text] / O. V. Glazeva, V. V. Budashko, S. F. Samonov // Technology audit and production reserves. – 2016. – V. 5. – 1(31). – 63-73. Doi:[10.15587/2312-8372.2016.81407](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81407).



- [12] Будашко, В. В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна [Текст] / В. В. Будашко // Електротехніка і Електромеханіка. 2015. №6. – С. 20–25. ISSN 2074–272X. Doi:[10.20998/2074–272X.2015.6.02/50764](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.02/50764).
- [13] Будашко В. В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2014. – № 38 (1081). – С. 45-51.
- [14] Шевченко В.А. Оптимизация управления электростанцией из условия минимума расхода топлива и с учетом метеоусловий // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. С. 94–103.
- [15] Шевченко В. А. Алгоритм быстрой оценки параметров судовых электроэнергетических систем // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – 2018. – №3(244). – С. 136 – 141.
- [16] Шевченко В.А. Решение задачи оптимального управления подгонкой частоты дизель-генераторов в судовых электроэнергетических установках // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2018. – №2(10). – С. 88-96.

## References

- [1] Emam, S.E.A., Automatic digital synchronization, International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering, ICEEC'04, (2004). p. 778-784.
- [2] Çolak, ø., Bayındır, R., Sefa, ø., Demirbaú, ù., Bal, G., Developing of a control unit for the parallel operation of AC generators, TPE'06 3rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, (2006). p. 134-137.
- [3] Shevchenko, V.A. *Verifikatsiya funktsional'nykh algoritmov systemy upravleniya mnogoagregatnoy sudovoy elektricheskoy stantsiy* [Ship's multiunit electrical power plant control system algorithms verification] [Text. Ship's technical means automatization: nauchn. tehn. sb. – 2015. – Iss. 21. Odesa: ONMA. – p. 70-76.
- [4] Zakharchenko, V.N. *Resheniye zadach upravleniya sudovoy elektroenergeticheskoy ustanovkoy pri izmenenii nagruzki* [Ship's electrical power plant control tasks solving when load changing] [Text] . V.N. Zakharchenko, V.A. Shevchenko . Ship's power plants: nauchn. tehn. sb. – 2015. – Iss. 36. Odesa: ONMA. – p. 74-82.
- [5] Shevchenko, V.A. *Sposob verifikatsii funkcional'nykh algoritmov systemy upravleniya mnogoagregatnoy sudovoy jelektricheskoy stantsiej* [Text. Nauk. Vistnyk KDMA: nauchn. tehn. sb. – 2015. – Iss. 1. – p. 296-301.
- [6] Clarke, N.J. (2004), Marine electrical power systems, 2nd Intern. Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2004 (PEMD 2004)
- [7] Fossen, T.I. (2002), Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics AS, Trondheim, Norway
- [8] Milosevic, M and G. Andersson (2005), Generation Control in Small Isolated Power Systems, North American Power Symposium (NAPS), Ames, USA, 2005
- [9] Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi:[10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543).
- [10] Budashko, V. V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №2. – P. 62 – 72. Doi:[10.20998/2074-272X.2017.2.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.10).
- [11] Budashko, V. V. Conceptualization of research of power hybrid electric power complexes [Text] / O. V. Glazeva, V. V. Budashko, S. F. Samonov // Technology audit and production reserves. – 2016. – V. 5. – 1(31). – 63-73. Doi:[10.15587/2312-8372.2016.81407](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81407).
- [12] Budashko, V. V. *Implementarnyj podhod pri modelirovanii jenergeticheskikh processov dinamicheski pozicionirujushhego sudna*. Electrical engineering & electromechanics. – 2015. – №6. – P. 20 – 25. ISSN 2074–272X. Doi:[10.20998/2074–272X.2015.6.02/50764](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.02/50764).
- [13] Budashko, V. V. *Udoskonalennya sy`stemy` upravlinnya pidrulyuyuchy`m pry`stroyem kombinovanogo propul'sy`vnogo kompleksu*. V. Budashko, O. Onishchenko. Visnyk Nacz. techn. un-tu "XPI" : zb. nauk. pr. Temat. vy`p. : Elektry`chni mashy`ny` ta elektromexanichne peretvorennya energiyi. – Kharkiv : NTU "KPI". – 2014. – № 38 (1081). – P. 45-51.
- [14] Shevchenko, V.A. *Optimizacija upravlenija jelektrostantsiej iz uslovija minimuma rashoda topliva i s uchetom meteouslovij* [Visnyk Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu. Serija: Tehnichni nauky] – 2018. № 4. p. 94–103.
- [15] Shevchenko, V.A. *Algoritm bystroj ocenki parametrov sudovyh jelektrojenergeticheskikh sistem* [Visnyk shidnoukrai'ns'kogo nacional'nogo universytetu imeni Volodymyra Dalja] – 2018. – №3(244). – p. 136 – 141.



- [16] Shevchenko, V.A. *Reshenie zadachi optimal'nogo upravlenija podgonkoj chastoty dizel'-generatorov v sudovyh jelectrojenergeticheskix ustanovkax* [Zbirnyk naukovykh prac' Vijs'kovoi' akademii' (m. Odesa)] – 2018. – №2(10). – p. 88-96.