

УДК 621.313.3

А.Н. Малыш<sup>1</sup>, Ю.Й. Кушнерук<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Академія внутрішніх військ, Харків**УПРАВЛЕНИЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ В ПРОЦЕССЕ СИНХРОНИЗАЦИИ**

*В статье изложена задача оптимизации управления процессом пуска дизель-генератора при синхронизации. Предложен метод ступенчатых управляющих воздействий, получены расчетные соотношения для определения величины управляющих воздействий и моментов переключения.*

*синхронизация дизель-генератора, пуск дизель-генератора, реакция системы*

**Введение**

**Постановка задачи.** Процесс синхронизации завершится успешно в случае, если включение генераторов на параллельную работу будет осуществлено тогда, когда значение начальных параметров синхронизации (угол  $\delta$  между синхронизируемыми напряжениями, угловая частота скольжения  $\omega_s$ , равная разности между угловыми частотами включаемых генераторов  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , и неодинаковость амплитуд синхронизируемых напряжений  $\Delta U = U_1 - U_2$ ) не превысит допустимых значений, т.е. когда выполняются следующие условия:

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}}; \quad \omega_s \leq \omega_{s \text{ доп}}; \quad \Delta U \leq \Delta U_{\text{доп}}. \quad (1)$$

Операция выравнивания (подгонки) частот синхронизируемых напряжений является одной из наиболее ответственных процедур, выполняемых в процессе синхронизации. В ходе этой операции включенный генератор как можно быстрее должен быть приведен в подсинхронное состояние, т.е. в такое состояние, в котором синхронизация будет возможна и завершится успешно. Требование ускорения выполнения этой операции связано прежде всего с тем, что синхронизация проводится для предупреждения возможной аварийной ситуации в системе электроснабжения, вызываемой перегрузкой работающих генераторов. Естественно, что чем быстрее включаемый генератор возьмет на себя часть нагрузки, тем выше будет качество электрической энергии в системе электроснабжения, и тем меньше скажутся последствия перегрузки на работу электроприемников этой системы.

Представим задачу приведения включаемого генератора в подсинхронное состояние как задачу оптимальной по быстродействию встречи двух движущихся объектов [6, 7]. В этой задаче работающий генератор (внешняя сеть) является объектом А, ротор которого совершает равномерное вращательное движение с угловой частотой вращения, равной  $\omega_A$ . Фазовая координата  $\delta_A$  этого объекта в любой момент времени  $t$  определяется следующим образом:

$$\delta_A = \delta_0 + \omega_A t, \quad (2)$$

где  $\delta_0$  – постоянная величина

В наиболее общем варианте включаемый генератор представим как объект В, начинающий дви-

жение из точки с координатами  $\delta_B(0)$ . Таким образом, фактически решается задача управления процессом пуска включаемого генератора. В процессе решения рассматриваемой задачи будем искать закон управления  $h(t)$  рейкой топливного насоса (в случае, если приводной двигатель является дизелем). При этом перевод включаемого генератора в подсинхронное состояние должен быть осуществлен за минимально возможное время  $T$ . Как и в любой другой подобной задаче, введем ограничение на перемещение органа управления, которое не должно превышать величину  $h_{\text{макс}}$ .

**Анализ литературы.** Задача управления дизель-генератором в процессе его пуска рассматривалась в [1 – 5, 11, 12]. В этих работах рассматривались вопросы динамики одно-, двух- и трехмассовых систем и решались соответствующие задачи синтеза систем регулирования скорости применительно к тем или иным критериям качества переходного процесса. Однако в этих и других работах [9, 10, 13 – 16.] задача оптимального по быстродействию пуска двигателя не ставилась и не решалась.

**Цель статьи** – вывод соотношений для определения закона управления регулятором скорости дизель-генератора в процессе синхронизации.

**Основная часть**

Фазовая координата  $\omega_B$  объекта В в самом общем случае определяется из уравнения ( $m < n$ )

$$\begin{aligned} \frac{d^n \omega_B}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} \omega_B}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{d \omega_B}{dt} + a_n \omega_B = \\ = b_1 \frac{d^m \eta}{dt^m} + \dots + b_m \eta, \end{aligned} \quad (3)$$

На управление  $\eta$  наложено ограничение вида

$$0 \leq \eta \leq \eta_{\text{макс}}. \quad (4)$$

Введя рассогласование  $X$  между координатами объектов А и В, где  $X = \omega_B - \omega_A$ , представим (3) в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^n X}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} X}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dX}{dt} + X = \\ = b_1 \frac{d^m h}{dt^m} + \dots + b_m h - \omega_A. \end{aligned} \quad (5)$$

Начальные условия рассматриваемой задачи имеют следующий вид:

$$x(0) = -\omega_A = -\omega_{ном}; \quad x'(0) = x''(0) = \dots x^n(0) = 0.$$

В рассматриваемой задаче минимизируется время  $T$  перехода системы из начального состояния в конечное, определяемое из равенств

$$x(T) = \omega_{спрвч}; \quad x'(T) = x''(T) = \dots x^n(T) = 0, \quad (6)$$

где  $\omega_{спрвч}$ , исходя из возможных погрешностей в процессе управления движением, вызванных непредвиденным изменением нагрузки, должна быть принята равной  $\omega_{слон}/2$ .

Характер закона управления определяется расположением нулей и полюсов передаточной функции, определяемой видом уравнения (5). В случае простых полюсов реализация закона управления не представляет никаких трудностей.

Рассмотрим более сложные случаи, когда кроме простых полюсов имеются комплексные сопряженные полюса. Все многообразие возможных вариантов будет представлять собой линейную комбинацию двух частных случаев: передаточная функция уравнения (5) имеет простой ноль и пару комплексных сопряженных полюсов и случай, когда передаточная функция этого уравнения имеет простой ноль, простой полюс и пару комплексных сопряженных полюсов. В первом случае передаточная функция рассматриваемой системы имеет вид

$$W(p) = \frac{b_1 p + b_2}{p^2 + a_1 p + a_2} = \frac{b_1 p + b_2}{p^2 + 2\rho\omega_n + \omega_n^2}, \quad (7)$$

где  $\omega_n = \sqrt{a_2}$  – собственная частота недемпфированных колебаний;  $\rho = a_1/2\sqrt{a_2}$  – коэффициент демпфирования;  $\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - \rho^2}$  – собственная частота демпфированных колебаний.

Расположение полюсов передаточной функции показано на рис. 1, а. Реакция рассматриваемой системы  $x(t)$  на скачок с амплитудой  $h_{ном}$  показана на рис. 1, б и имеет следующий вид:

$$x(t) = h_{ном} \left[ 1 - (\omega_n/\omega_0) e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \alpha) \right], \quad (8)$$

где  $\alpha = \arctg(\omega_0/(\rho\omega_n))$ .

Для любого момента времени  $t$  величина ошибки  $e(t)$  равна разности  $h_{ном} - h(t)$  и определится как

$$e(t) = h_{ном} \frac{\omega_n}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \alpha). \quad (9)$$

Скорость изменения ошибки  $e'(t)$  получим, проведя дифференцирование выражения (9):

$$\begin{aligned} e'(t) &= -h_{ном} \frac{\omega_n^2 \rho}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \alpha) + \\ &+ h_{ном} \frac{\omega_n}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} \cos(\omega_0 t + \alpha) \omega_0 = \\ &= -h_{ном} \frac{\omega_n^2 \rho}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} [\sin(\omega_0 t) \cos \alpha + \cos \omega_0 t \sin \alpha] + \\ &+ h_{ном} \omega_n e^{-\rho\omega_n t} [\cos(\omega_0 t) \cos \alpha - \sin \omega_0 t \sin \alpha]. \end{aligned} \quad (10)$$

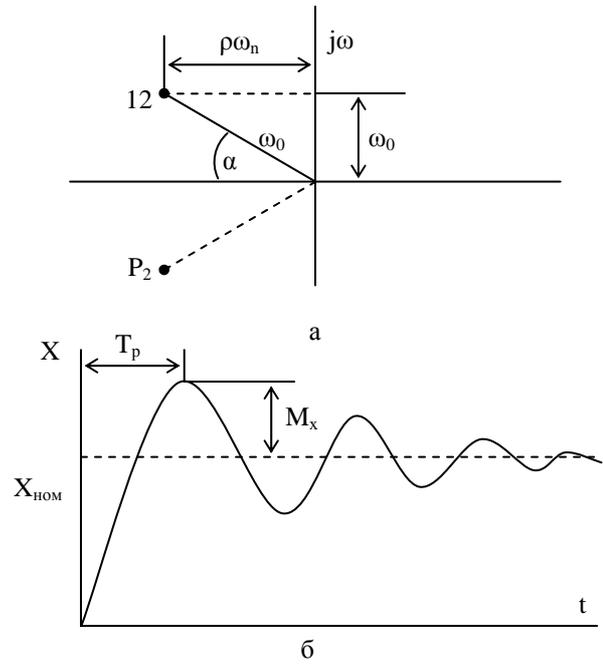


Рис. 1. Полюса передаточной функции и переходный процесс в системе, описываемой дифференциальным уравнением 2-го порядка

Так как  $\cos \alpha = \rho$ , а  $\sin \alpha = \omega_0/\omega_n$ , то

$$\begin{aligned} e'(t) &= -h_{ном} \frac{\omega_n^2 \rho}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} \sin \omega_0 t - h_{ном} \omega_n \rho e^{-\rho\omega_n t} \times \\ &\times \cos \omega_0 t + h_{ном} \omega_n \rho e^{-\rho\omega_n t} - h_{ном} \omega_0 e^{-\rho\omega_n t} \sin \omega_0 t = \\ &= -h_{ном} \left( \frac{\omega_n^2 \rho^2}{\omega_0} \right) e^{-\rho\omega_n t} \sin \omega_0 t = -h \frac{\omega_n^2}{\omega_0} e^{-\rho\omega_n t} \sin \omega_0 t. \end{aligned} \quad (11)$$

Соотношение (11) получено, исходя из того, что  $\omega_0^2 + \rho^2 \omega_n^2 = \omega_n^2$ . Скорость изменения ошибки  $e'(t)$  принимает нулевое значение в моменты времени  $t$ , определяемые соотношением

$$t = \pi n / \omega_0, \quad (12)$$

где  $n=1,2,3\dots$

Очевидно, что если бы в одном из этих моментов времени ошибку системы  $e(t)$  удалось бы обратить в нуль, то переходный процесс закончился, и изменение фазовой координаты прекратилось.

Выход системы физически не может измениться мгновенно, однако на скорость изменения входного воздействия ограничения не накладывается. Поскольку ошибка представляет собой разность  $h - h(t)$ , то ее можно сделать равной нулю в моменты времени  $t$ , определяемые соотношением (12), изменив соответствующим образом значение входа  $h$ .

Если конечное значение входа должно быть равно  $h_1$ , то соответствующим подбором начального значения  $h_0$  и переключением входа с  $h_0$  на  $h_1$  в момент времени  $t = \pi n / \omega_0$  возможно исключить переуправление  $M(h)$ , равное

$$M(h) = h e^{-\pi\rho/\sqrt{1-\rho^2}}, \quad (13)$$

и завершить переход системы в подсинхронное состояние. Таким образом, входное воздействие

$$h = h_0 + (h_1 - h_0)(t - \pi/\omega_0). \quad (14)$$

Ошибка системы рассчитывается как

$$\begin{aligned} e(t) = & h_0 + (h_1 - h_0)(t - \pi/\omega_0) - \\ & - h_0 \left[ 1 - (\omega_n/\omega_0) e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \alpha) \right] - \\ & - (h_1 - h_0) \left[ 1 - (\omega_n/\omega_0) e^{-\rho\omega_n(t-\pi/\omega_0)} \sin[\omega_0(t-\pi/\omega_0) + \alpha] \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Если  $e(t = \pi/\omega_0) = 0$ , то  $h_1 - h_0(1 + m) = 0$  (16)

или  $h_0 = h_1/(1 + M)$ . (17)

Для реализации полученного закона управления необходимо изменить в момент времени  $T_p = \pi/\omega_0 = \pi/(\omega_n \sqrt{1-\rho^2})$  положение рейки топливного насоса с  $h_0$  на  $h_1$ .

Соответствующее техническое решение состоит в том, что при пуске дизель-генератора рейка топливного насоса должна быть установлена в положение, при котором к моменту времени  $T_p$  обеспечивается выход агрегата на номинальную частоту вращения, а в момент времени  $T_p$  рейка топливного насоса должна быть переведена на номинальную подачу топлива. Рассмотренный алгоритм можно реализовать с помощью программного устройства, воздействующего на управляющий золотник регулятора частоты вращения.

Для случая, когда передаточная функция объекта имеет простой ноль, простой полюс и пару комплексных сопряженных корней, перевод включаемого генератора в подсинхронное состояние в кратчайшее время будет возможен, если обеспечить, чтобы в требуемый момент времени, ошибка (отклонение фазовой координаты) и ее первая и вторая производные будут обращены в нуль. Для этой цели надо иметь возможность изменять входное воздействие с помощью программного устройства (рис. 2). Управление, как и в случае пары комплексных сопряженных корней, будем искать в виде ступенчатых управляющих воздействий.

Для определения моментов  $t_0$  и  $t_1$  и требуемого соотношения между величинами  $h_0$ ,  $h_1$  и  $h_2$  запишем уравнение для ошибки  $e(t)$  и ее производных  $\dot{e}(t)$  и  $\ddot{e}(t)$ , соответствующие интервалу времени  $0 < t < t_0$ , когда на вход системы подано управляющее воздействие  $h_0$ :

$$\begin{aligned} e(t) = & h_0 \cdot B \left[ K e^{-Pt} + e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \phi + \alpha) \right]; \\ \dot{e}(t) = & -h_0 \cdot B \left[ P K e^{-Pt} + \omega_n e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \phi) \right]; \\ \ddot{e}(t) = & h_0 \cdot B \left[ P^2 K e^{-Pt} + \omega_n e^{-\rho\omega_n t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \phi - \alpha) \right], \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\alpha = \arctg(\omega_0/(\rho \cdot \omega_n))$ ;  $\Theta = \arctg(\omega_0/(Z - \rho \cdot \omega_n))$ ;

$\phi = \arctg(\omega_0/(P_1 - \rho \cdot \omega_n))$ ;

$$B = \frac{\sqrt{\omega_0^2 + (Z - \rho \cdot \omega_n)^2}}{Z} \cdot \frac{P_1}{\sqrt{\omega_0^2 + (P_1 - \rho \cdot \omega_n)^2}} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_0};$$

$$K = \frac{\frac{\omega_n^2(Z - P_1)}{Z(\omega_n^2 + (P_1 - \rho \cdot \omega_n)^2)}}{\frac{\sqrt{\omega_0^2 + (Z - \rho \cdot \omega_n)^2}}{Z} \cdot \frac{P_1}{\sqrt{\omega_0^2 + (P_1 - \rho \cdot \omega_n)^2}} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_0}}.$$

Величины  $P_1, Z, \omega_n, \omega_0, \rho$  определяются в соответствии с (рис. 2, в) для значений  $a_i$  и  $b_i$ , являющихся коэффициентом уравнения (4).

Представленное на рис. 2, б входное воздействие записывается в виде:

$$h = h_0 + (h_1 - h_0)(t - t_0) - (h_2 - h_0)(t_1 - t_0). \quad (19)$$

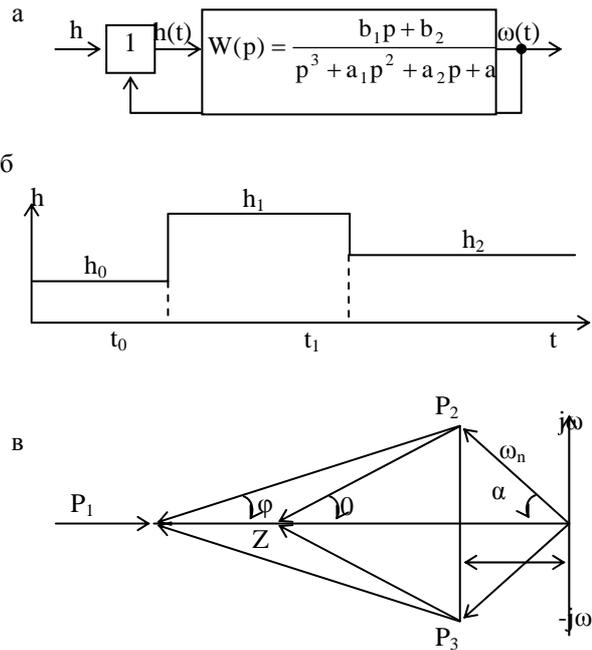


Рис. 2. Управление процессом пуска

Ошибка и ее производные будут равны нулю в момент времени  $t_1$ , если удастся найти значения  $h_0, h_1, t_0$  и  $t_1$ , при которых будут удовлетворяться следующие соотношения:

$$\begin{aligned} & K \left[ h_0 \cdot e^{-P_1 t_1} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-P_1(t_1 - t_0)} + (h_2 - h_1) \right] + \\ & + h_0 \cdot e^{-\rho\omega_n t_1} \times \sin(\omega_n t_1 + \Theta - \phi + \alpha) + (h_1 - h_0) \times \\ & \times e^{-\rho\omega_n(t_1 - t_0)} \sin[\omega_0(t_1 - t_0) + \Theta - \phi + \alpha] + \\ & + (h_2 - h_1) \cdot \sin(\Theta - \phi + \alpha) = 0; \\ & P_1 K \left[ h_0 \cdot e^{-P_1 t_1} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-P_1(t_1 - t_0)} + (h_2 - h_1) \right] + \\ & + \omega_n \{ h_0 \cdot e^{-\rho\omega_n t_1} \times \sin(\omega_0 t_1 + \Theta - \phi) + (h_1 - h_0) \times \\ & \times e^{-\rho\omega_n(t_1 - t_0)} \sin[\omega_0(t_1 - t_0) + \Theta - \phi] + \\ & + (h_2 - h_1) \cdot \sin(\Theta - \phi) \} = 0; \\ & P_1^2 K \left[ h_0 \cdot e^{-P_1 t_1} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-P_1(t_1 - t_0)} + (h_2 - h_1) \right] + \\ & + \omega_n^2 \{ h_0 \cdot e^{-\rho\omega_n t_1} \times \sin(\omega_0 t_1 + \Theta - \phi - \alpha) + (h_1 - h_0) \times \\ & \times e^{-\rho\omega_n(t_1 - t_0)} \sin[\omega_0(t_1 - t_0) + \Theta - \phi - \alpha] + \\ & + (h_2 - h_1) \cdot \sin(\Theta - \phi - \alpha) \} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Синусоидальные члены в каждом из уравнений (20) становятся подобными при  $\omega_0 t_1 = 2\pi$ , а  $\omega_0(t_1 - t_0) = \pi$ . Таким образом, если переключения происходят в момент времени  $t_0 = \pi/\omega_0$  и  $t_1 = 2\pi/\omega_0$ , то для равенства нулю ошибки и ее производных необходимо:

$$h_0 \cdot e^{-2\pi p_1/\omega_0} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-\pi p_1/\omega_0} + (h_2 + h_1) = 0; \quad (21)$$

$$h_0 \cdot e^{-2\pi r\omega_n/\omega_0} - (h_1 - h_0) \cdot e^{-\pi r\omega_n/\omega_0} + (h_2 - h_1) = 0.$$

Из (21) можно найти, что

$$h_0 = h_1 \left/ \left( 1 - \frac{e^{-2\pi p_1/\omega_0} - e^{-2\pi r\omega_n/\omega_0}}{e^{-\pi p_1/\omega_0} - e^{-\pi r\omega_n/\omega_0}} \right) \right.; \quad (22)$$

$$h_1 = \frac{h_2}{1 - \frac{e^{-2\pi p_1/\omega_0} - e^{-2\pi r\omega_n/\omega_0}}{e^{-\pi p_1/\omega_0} - e^{-\pi r\omega_n/\omega_0}} - \frac{e^{-2\pi p_1/\omega_0} - e^{-2\pi r\omega_n/\omega_0}}{e^{-\pi p_1/\omega_0} - e^{-\pi r\omega_n/\omega_0}}}$$

Для управления дизель-генератором, передаточная функция которого имеет порядок выше третьего, необходимо найти положение полюсов, расположенных ближе всего к мнимой оси, и компенсировать колебательный характер переходного процесса, определяемый этими полюсами, соответствующими ступенчатыми управляемыми воздействиями. Компенсация влияния нежелательных полюсов системы может быть осуществлена совмещением нуля воздействия с полюсом системы [8]. Недостаток этого метода состоит в том, что в начальный момент полюс не компенсируется нулем и влияет на реакцию системы до тех пор, пока не скомпенсируется нулем. Для случая, когда полюса системы второго порядка определяются следующим образом:

$$P_1 = -r\omega_n + j\omega_0; \quad P_2 = -r\omega_n - j\omega_0, \quad (23)$$

для компенсации полюсов, следует использовать нули, изображенные на рис. 3 кружками.

Для рассматриваемого варианта компенсации  $h_1 > h_0$ ,  $\omega_0 = \pi/t_0$  и  $r\omega_n = (1/t_0) \cdot \log(h_0/(h_1 - h_0))$ . (24)

Управляющее воздействие задается соотношениями  $t_0 = \pi/\omega_0$  и  $h_0/(h_1 - h_0) = e^{r\omega_n t_0}$

### Выводы

1. Для приведения включаемого генератора в подсинхронное состояние необходимо осуществить целенаправленное воздействие на его регулятор частоты вращения.

2. Для определения характера управляющего воздействия в процессе выравнивания частот надо найти расположение полюсов и нулей передаточной функции уравнения динамики дизель-генератора.

3. Управление процессом выравнивания частот следует вести ступенчатыми управляющими воздействиями, амплитуда и время изменения которых определяются положением полюсов и нулей передаточной функции, получаемой из уравнения динамики дизель-генератора.

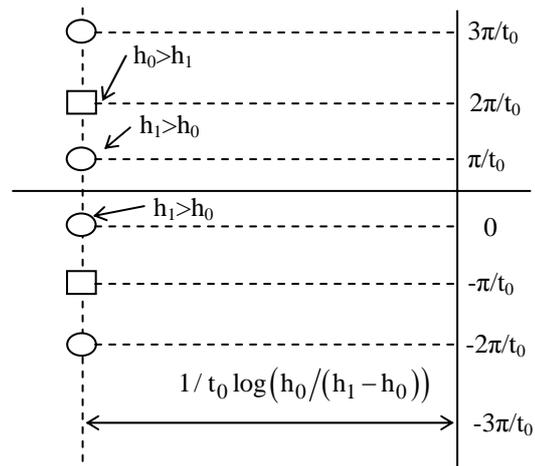


Рис. 3. Компенсация влияния полюсов передаточной функции

4. Для технической реализации метода ступенчатых управляющих воздействий необходимо изменить конструкцию регулятора частоты вращения, введя в его состав электромагнит или гидроупор, управляемый программным устройством и воздействующий на управляющий золотник исполнительного поршня, связанного с рейкой топливного насоса.

### Список литературы

1. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния / Л.В. Акимов, В.И. Колотило, В.С. Марков – Х.: ХГПУ, 2000. – 93 с.
2. Динамика трехкратноинтегрирующей СПР скорости с наблюдателями состояния полного и пониженного порядков / Л.В. Акимов, В.Т. Долбня, В.И. Колотило // Техн. электродинамика. – 1998. – № 4. – С. 52-63.
3. Додо Амаду Маман Мустафа. Пристрої автоматичного частотного розвантаження енергосистем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Харк. держ. політехн. ун-т. – Х., 2000. – 19 с.
4. Дослідження САР одномасової системи, синтезованої методом узагальненого характеристичного полінома / Я.Ю. Маруцак, В. Кравцов // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2000. – № 403. – С. 101-107.
5. Дуель М.О. Автоматизовані системи управління технологічними процесами енергоблоків теплових електростанцій: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.07 / Харк. держ. політехн. ун-т. – Х., 1998. – 34 с.
6. Константинов В.Н. Синхронизация судовых синхронных генераторов. – Л.: Судостроение, 1978. – 214 с.
7. Конструювання, проектування, надійність засобів автоматики і вимірювальної техніки в прикладах і задачах / Я.І. Каліцький, В.О. Поджаренко, О.Г. Ігнатенко. – Вінниця: Вінниц. держ. техн. ун-т. – 2001. – 196 с.
8. Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движущейся. – М.: Наука, 1979. – 420 с.
9. Моделирование электромеханических переходных процессов в электрических машинах переменного тока на основе экспериментальных частотных характеристик / А.М.Ларин, Ламари Абдессалем // Вісн. нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2000. – № 403. – С. 79-86.
10. Определение параметров первичных статических характеристик энергосистемы в стационарных режимах методом разделения и усреднения // Вестник НТУ "ХПИ". – 2000. – № 127. – С. 127-129.

11. Перспективи розвитку приладобудування, інформаційно-вимірвальних систем та метрологічного забезпечення для електроенергетики України / Ф.Б. Гриневич, С.Г. Таранов, Б.Г. Марченко, М.В. Мисловіч // Техн. електродинаміка. – 2000. – № 6. – С. 3-12.

12. Принципы работы, выбора уставок и объемов автоматизации частотного пуска объединенной энергосистемы Украины / А.И. Воєвода, А.И. Редин и др. // Техн. електродинаміка. – 1999. – №5. – С. 63-66.

13. Разработка автосинхронизатора АСПУ и усовершенствованного устройства АПВ с улавливанием синхронизма. Ч. 2. – М.: МЭИ, 1972. – 59 с.

14. Рохленко И.З., Лозе А.Б. Устройство для проверки автосинхронизаторов // Электрические станции. – 1975. – № 4. – С. 80-81.

15. Рохленко И.З., Лозе А.Б. Генератор низкочастотных биений // Электрические станции. – 1976. – №2. – С. 88-90.

16. Сыромятников И.А. Применение способа синхронизации для включения синхронных машин на параллельную работу // Электричество. – 1954. – № 8. – С. 3-9.

Поступила в редколлегию 22.10.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба. Харьков.