

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ СИНХРОНИЗАЦИИ

д.т.н., проф. Б.Т. Кононов, А.Н. Малыш

*Рассматриваются условия обеспечения качества электрической энергии в процессе синхронизации. Предлагается для приведения генераторов в состояние синхронизма управлять регулятором частоты ступенчатыми воздействиями. Приводятся расчётные соотношения для определения как собственно управляющих воздействий, так и моментов времени для переключения генератора на параллельную работу.*

Дизель-инерционная установка гарантированного питания включает-ся на параллельную работу при перегрузке работающей установки и при переводе системы гарантированного питания в режим дежурства. Естественно, что, чем быстрее она начнет работать параллельно, тем выше будет качество электрической энергии, потребляемой электроприёмниками.

Рассмотрим задачу приведения системы гарантированного питания в подсинхронное состояние как задачу оптимальной по быстродействию встречи двух движущихся объектов [1]. Ротор работающей установки гарантированного питания (сетового ввода) можно представить как объект **A**, совершающий равномерное вращательное движение с угловой скоростью  $\omega_A$ . Фазовая координата **A**  $\delta_A$  в любой момент времени определяется в соответствии с уравнением

$$\delta_A = \delta_0 + \omega_A t, \quad (1)$$

где  $\delta_0$  – постоянная величина;  $t$  – текущее время.

Включаемую установку гарантированного питания можно представить как объект **B**, начинающий движение из точки с координатами  $\delta_{B(0)} = \dot{\delta}_{B(0)} = \ddot{\delta}_{B(0)} = 0$ . При определении закона изменения фазовой координаты  $\dot{\delta}_{B(0)} = \omega_B$  объекта **B** будем исходить из того, дизель – инерционная установка, оснащенная дизелем типа **AC** с трубнонаддувом при пренебрежении постоянными времени впускного  $T_B$  и выпускного  $T_T$  коллекторов и в случае установки топливноподающей аппаратуры с перепуском топлива, описывается звеном третьего порядка [2]. Изменение угловой частоты вращения  $\omega_B$  включаемой установки гарантированного питания определяется из уравнения

$$\frac{d^3 \omega_B}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 \omega_B}{dt^2} + a_2 \frac{d\omega_B}{dt} + \omega_B = b_1 \frac{du}{dt} + b_2 u, \quad (2)$$

где на управление наложено ограничение вида  $\mathbf{0} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{h}_{\max}$ . Введя рассогласование между координатами объектов  $\mathbf{x} = \omega_B - \omega_A$ , представим (2) в виде

$$\frac{d^3 \mathbf{x}}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + a_2 \frac{d\mathbf{x}}{dt} + a_3 \mathbf{x} = b_1 \frac{du}{dt} + b_2 u - \omega_A, \quad (3)$$

где  $\mathbf{x}(0) = -\omega_A$ ;  $\dot{\mathbf{x}}(0) = \ddot{\mathbf{x}}(0) = \ddot{\mathbf{x}}(0) = \mathbf{0}$ .

Если ввести теперь фазовые координаты для переменной  $x$ , обозначив  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_1$ ,  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_2$ ,  $\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_3$ ,  $\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_4$ , то задачу синхронизации систем гарантированного питания из исходного состояния с координатами  $\mathbf{x}_1 = -\omega_A$ ,  $\mathbf{x}_2 = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{x}_3 = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{x}_4 = \mathbf{0}$  в состояние с координатами  $\mathbf{x}_1 = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{x}_2 = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{x}_3 = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{x}_4 = \mathbf{0}$ .

Необходимо отметить, что рассмотренный случай имеет место при пуске установки гарантированного питания на обесточенные шины и при синхронизации с помощью безинерционного выключателя генератора. Более общим следует считать такой случай, когда при синхронизации необходимо учитывать инерционность выключателя генератора. В этом случае для получения оптимального по быстродействию управления нужно обеспечить, чтобы угол между синхронизируемыми напряжениями к моменту замыкания контактов выключателя генератора был равен нулю. Для достижения указанной цели команду на включение выключателя генератора следует подать с упреждением в момент времени, предшествующий попаданию изображающей точки фазовой траектории в начало координат. Упреждение обеспечивается путем подачи команды на включение выключателя генератора с постоянным углом опережения  $\delta_{\text{он}} = \text{const}$  (рис.1, а), с постоянным временем опережения  $t_{\text{он}} = \text{const}$  (рис.1, б) и с переменным углом опережения в зоне допустимых значений углов сдвига фаз между синхронизируемыми напряжениями (рис.1, в, г).

У синхронизаторов с постоянным углом опережения линия 2 и описывается следующим выражением

$$\delta_{\text{вкл}} = \delta_{\text{расч}} = \text{const}. \quad (4)$$

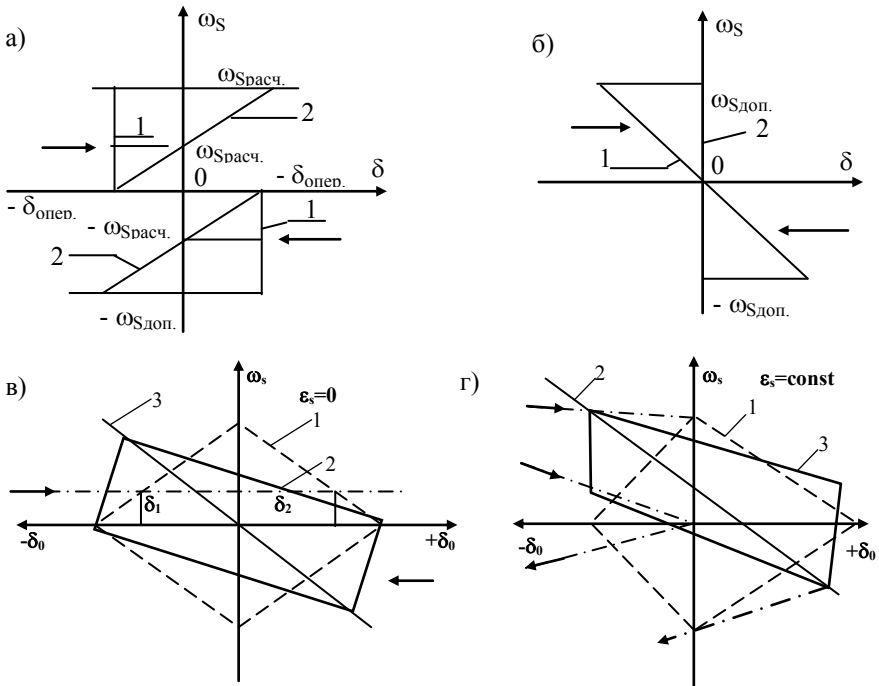
У синхронизаторов с постоянным временем опережения команда на включение должна подаваться, если угол включения определяется из выражения

$$\delta_{\text{вкл}} = \delta_{\text{расч}} = - \left( \omega_s t_{\text{вкл}} + \varepsilon_s \frac{t_{\text{вкл}}^2}{2} \right), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_s$  – ускорение скольжения;  $t_{\text{вкл}}$  – время включения выключателя генератора.

Угловая скорость скольжения  $\omega_s$  при упреждении в соответствии с (4) и (5) не должна превышать предельно допустимого значения  $\omega_{s\text{доп}}$ . У синхро-

низаторов с постоянным углом и синхронизаторов с постоянным временем опережения команда на включение выключателя генератора может быть подана лишь в одной точке, когда значение текущего угла  $\delta$  совпадает с расчётным, определяемым из выражений (4) и (5). Это затрудняет синхронизацию и



может вызвать при случайном пропуске команды на включение увеличение времени, затрачиваемого на включение установок гарантированного питания, на величину, равную периоду биений синхронизируемых напряжений.

Рис. 1. Учёт инерционности выключателя генератора при синхронизации

Для исключения затягивания процесса синхронизации и, исходя из возможности осуществления синхронизации в допустимом диапазоне значений начальных параметров синхронизации, предлагается использовать синхронизаторы с переменным углом опережения в зоне допустимых значений углов сдвига фаз, так называемые зонные синхронизаторы [3]. У этих синхронизаторов линия включения трансформируется в зону, а команда на включение может подаваться во всем диапазоне допустимых значений угловой частоты скольжения после того, как изображающая точка фазовой траектории попадает в зону включения

$$\delta_{\text{расч}} + \delta_c(\omega_S) \geq \delta_{\text{вкл}} \geq \delta_{\text{расч}} - \delta_c(\omega_S), \quad (6)$$

где  $\delta_{\text{расч}}$  определяется из (4) или (5);  $\pm \delta_c(\omega_S)$  - угол сдвига фаз между напряжениями, определяемый из сепаратрисы, обеспечивающей в координа-

тах  $\delta$ ,  $\omega_s$  успешную синхронизацию с требуемым качеством напряжения.

Рис. 1, в, г иллюстрируют построение зоны включения для случаев, когда  $\varepsilon_c = 0$  и  $\varepsilon_c = \text{const}$ . Сепаратриса 1 выбрана для упрощения построения в виде ломаной линии. Линия включения 2 соответствует (5) и обеспечивает получение зоны включения 3. Штрих-пунктирными линиями на этих рисунках показано движение изображающей точки фазовой траектории.

Величина углового отрезка  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , лежащего в пределах сепаратрисы 1, характеризует выигрыш во времени, обеспечиваемый при применении предлагаемого способа управления движением.

В общем случае пуска установки гарантированного питания с последующей синхронизацией задачей системы управления будет являться обработка такого закона управления  $u(t)$ , чтобы изменение фазовых переменных  $x(t)$ , удовлетворяющих уравнению (3), обеспечивало минимум интеграла

$$Q = \int_0^T 1 \cdot dt, \text{ при условии, что на управление наложено ограничение вида}$$

$0 \leq u \leq h_{\max}$ . При этом начальные условия определяются из равенств

$$x_1(0) = -(\omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{расч}}); x_2(0) = x_3(0) = x_4(0),$$

а конечные условия определяются из равенств  $x_1(T) = x_2(T) = x_3(T) = x_4(T) = 0$ . Исходя из возможных погрешностей в процессе управления движением, вызываемых непредвидимыми изменениями нагрузки, величина  $\omega_{\text{расч}}$  должна быть принята равной  $\omega_{s_{\text{дон}}} / 2$ .

Характер управления регулятором частоты вращения в процессе синхронизации определяется видом уравнения (3), т.е. расположением нулей и полюсов передаточной функции, получаемой из (3). В случае простых полюсов реализация закона управления не представляет никаких трудностей. В случае, когда передаточная функция объекта имеет простой нуль, простой полюс и пару комплексных сопряжений полюсов задача приведения дизель-инерционной установки гарантированного питания в подсинхронное состояние будет реализована, если в какой-либо момент времени отклонение фазовой координаты (ошибка) и ее первая и вторая производная будут обращены в нуль. Для этой цели необходимо иметь возможность изменить входное воздействие с помощью специального релейного элемента 1 (рис. 2, а) таким образом, чтобы ошибка и ее производные уменьшились до нуля за минимально возможное время. Следуя [4], будем искать управление в виде ступенчатых управляющих воздействий (рис. 2, б).

Для определения моментов  $t_0$  и  $t_1$  и требуемого соотношения между величинами  $h_0$ ,  $h_1$  и  $h_2$  запишем уравнения 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  $h_0$ :

$$e(t) = h_0 \cdot B \left[ K e^{-p_1 t} + e^{-p_{\omega n} t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \varphi + \alpha) \right];$$

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= -h_0 \cdot B \left[ P_1 K e^{-P_1 t} + \omega_n e^{-\rho \omega_n t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \varphi) \right]; \\ \ddot{e}(t) &= h_0 \cdot B \left[ P_1^2 K e^{-P_1 t} + \omega_n e^{-\rho \omega_n t} \sin(\omega_0 t + \Theta - \varphi - \alpha) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\alpha = \text{arctg} \frac{\omega_0}{\rho \cdot \omega_n}$ ;  $\Theta = \text{arctg} \frac{\omega_0}{Z - \rho \cdot \omega_n}$ ;  $\varphi = \text{arctg} \frac{\omega_0}{P_1 - \rho \cdot \omega_n}$ ;

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

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

величины  $P_1$ ,  $Z$ ,  $\omega_n$ ,  $\omega_0$ ,  $\rho$  определяются в соответствии с рис. 2, в для значений  $a_i$  и  $b_i$ , являющихся коэффициентами уравнения (3).

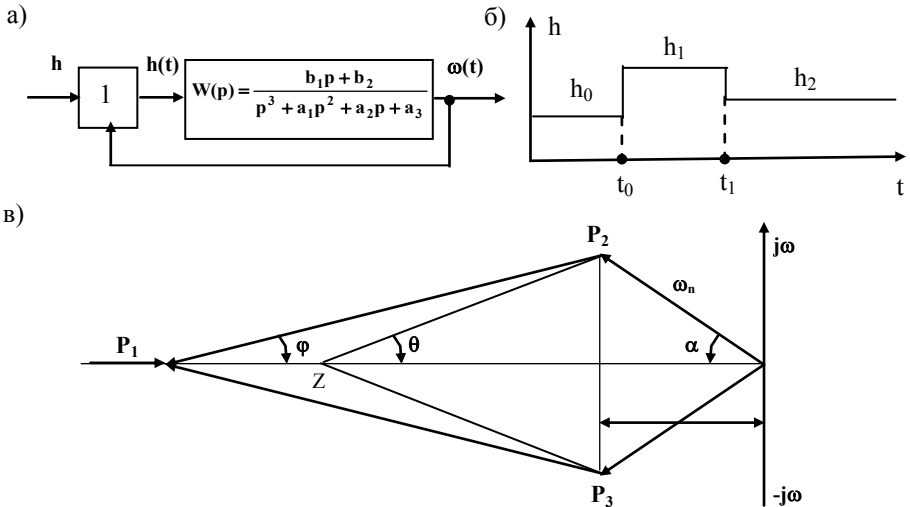


Рис. 2. Управление процессом пуска

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

$$h = h_0 + (h_1 - h_0) (t - t_0) - (h_2 - h_0) (t_1 - t_0). \quad (8)$$

Ошибка и её 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:

$$\begin{aligned}
 & K \left[ h_0 \cdot e^{-p_1 t_1} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-p_1(t_1 - t_0)} + (h_2 - h_1) \right] + h_0 \cdot e^{-\rho \omega_n t_1} \times \\
 & \times \sin(\omega_n t_1 + \Theta - \varphi + \alpha) + (h_1 - h_0) \cdot e^{-\rho \omega_n(t_1 - t_0)} \sin[\omega_0(t_1 - t_0) + \Theta - \varphi + \alpha] + \\
 & + (h_2 - h_1) \cdot \sin(\Theta - \varphi + \alpha) = 0 ; \\
 & P_1 K \left[ h_0 e^{-p_1 t_1} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-p_1(t_1 - t_0)} + (h_2 - h_1) \right] + \omega_n \left\{ h_0 \cdot e^{-\rho \omega_n t_1} \times \right. \\
 & \times \sin(\omega_0 t_1 + \Theta - \varphi) + (h_1 - h_0) \cdot e^{-\rho \omega_n(t_1 - t_0)} \sin[\omega_0(t_1 - t_0) + \Theta - \varphi] + \\
 & \left. + (h_2 - h_1) \sin(\Theta - \varphi) \right\} = 0 ; \\
 & P_1^2 K \left[ h_0 \cdot e^{-p_1 t_1} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-p_1(t_1 - t_0)} + (h_2 - h_1) \right] + \omega_n^2 \left\{ h_0 \cdot e^{-\rho \omega_n t_1} \times \right. \\
 & \times \sin(\omega_0 t_1 + \Theta - \varphi - \alpha) + (h_1 - h_0) \cdot e^{-\rho \omega_n(t_1 - t_0)} \sin[\omega_0(t_1 - t_0) + \Theta - \varphi - \alpha] + \\
 & \left. + (h_2 - h_1) \sin(\Theta - \varphi - \alpha) \right\} = 0 .
 \end{aligned} \tag{9}$$

Синусоидальные члены в каждом из уравнений (9) становятся подобным при  $\omega_0 t_1 = 2\pi$ , а  $\omega_0(t_1 - t_0) = \pi$ . Таким образом, если переключения происходят в момент времени  $t_0 = \frac{\pi}{\omega_0}$  и  $t_1 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ , то для равенства нулю ошибки и ее производных необходимо, чтобы тождественно удовлетворились следующие два условия:

$$\begin{aligned}
 & h_0 \cdot e^{-2\pi p_1 / \omega_0} + (h_1 - h_0) \cdot e^{-\pi p_1 / \omega_0} + (h_2 + h_1) = 0 ; \\
 & h_0 \cdot e^{-2\pi \rho \omega_n / \omega_0} - (h_1 - h_0) \cdot e^{-\pi \rho \omega_n / \omega_0} + (h_2 - h_1) = 0 .
 \end{aligned} \tag{10}$$

Из (10) можно найти, что

$$\begin{aligned}
 h_0 &= \frac{h_1}{1 - \frac{e^{-2\pi p_1 / \omega_0} - e^{-2\pi \rho \omega_n / \omega_0}}{e^{-\pi p_1 / \omega_0} - e^{-\pi \rho \omega_n / \omega_0}}} ; \\
 h_1 &= \frac{h_2}{1 - \frac{e^{-2\pi p_1 / \omega_0}}{e^{-2\pi p_1 / \omega_0} - e^{-2\pi \rho \omega_n / \omega_0}} - \frac{e^{-2\pi p_1 / \omega_0} - e^{-2\pi \rho \omega_n / \omega_0}}{e^{-\pi p_1 / \omega_0} - e^{-\pi \rho \omega_n / \omega_0}}} .
 \end{aligned} \tag{11}$$

Таким образом, при обеспечении ступенчатого управляющего воздействия в моменты времени  $t_0$  и  $t_1$  по закону (11) будет обеспечен неколебательный переходный процесс, оптимальный по быстрдействию. На интервале времени  $t_1 < t < \infty$  угловая частота скольжения роторов  $\omega_s$  не будет превышать значения, равного  $\omega_{s\text{доп}}/2$ , если обеспечить, чтобы количество топ-

лива, подаваемого в дизель, соответствовало заданной частоте вращения, т.е. чтобы  $U = h_2(\omega - \omega_{s\_доп} / 2)$ . Суть ограничения  $U \leq h_{max}$ , вводимого в закон управления, состоит в следующем. В случае, если в процессе управления значения управляющих воздействий  $h_0$  и  $h_1$  окажутся больше, чем  $h_{max}$ , то число переключений нужно увеличить на единицу. При выборе моментов переключения  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  и определении величин управляющих воздействий  $h_0$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  в функции от требуемого конечного управления  $h_3 \cdot (\omega_1 - \omega_{s\_доп} / 2)$  следует поступать аналогично рассмотренному случаю для трех переключений релейного элемента.

Реализация желаемого закона управления регулятором частоты вращения обеспечивается введением в его состав управляемого гидроупора пуска или электромагнита, управляющего золотником исполнительного сервомотора. При  $P_1 > \omega_0$ , что свойственно дизель-инерционной установке гарантированного питания с дизелем типа АС, достаточно входное воздействие переключить один раз, так как такое управление позволит уменьшить перерегулирование по крайней мере в пять раз.

При применении ступенчатых управляющих воздействий дизель-инерционная установка гарантированного питания оказывается подготовленной к включению на параллельную работу. Однако, в связи с тем, что в процессе управления движением возможны изменения нагрузки работающей установки, необходимо перед осуществлением процесса синхронизации проверить точность приведения включаемой установки в подсинхронное состояние. Неизбежность такой проверки обусловлена серьезными последствиями несинхронного включения установок гарантированного питания на параллельную работу. Функции проверки выполнения условий синхронизации, а при необходимости и точной доводки установки гарантированного питания в подсинхронное состояние выполняют устройства синхронизации. Точность работы синхронизаторов, а значит и качество напряжения на шинах гарантированного питания, зависит от способа формирования команды на включение генераторного выключателя. Точность работы синхронизатора определяется величиной угловой ошибки, представляющей собой разность между действительным значением угла между синхронизируемыми напряжениями в момент замыкания контактов выключателя генератора и расчетным значением угла, определяемым к этому моменту времени устройством синхронизации. Величина угловой ошибки синхронизатора непосредственным образом влияет на качество напряжения на шинах гарантированного питания в связи с тем, что при включении установок гарантированного питания на параллельную работу с углом  $\delta$ , значение которого отличается от  $\delta_{доп}$ , величина провала напряжения  $\delta U > \delta U_{доп}$ . При значениях углов включения, близких к  $\delta_{доп}$ , величина угловой ошибки в один градус приводит к увеличению провала напряжения примерно на 1 %. В связи с изложенным угловая погрешность синхронизатора не должна превышать величины, равной  $2 \div 3$  градуса.

Из известных в настоящее время синхронизаторов с постоянным углом и постоянным временем опережения предпочтение следует отдать последним, у которых угловая ошибка гораздо меньше. Угловая ошибка синхронизаторов с постоянным углом опережения определяется разностью фактической и расчётной угловых частот скольжения и величиной времени включения выключателя генератора, а угловая ошибка синхронизаторов с постоянным временем опережения определяется только возможным разбросом времени включения выключателя. В связи с этим синхронизаторы с постоянным углом опережения возможно применять только совместно с быстродействующими выключателями. В остальных случаях следует применять синхронизаторы с постоянным временем опережения или зонные синхронизаторы, у которых время опережения постоянно.

На величину угловой ошибки синхронизатора влияет и способ изменения начальных параметров синхронизации. Предпочтение следует при этом отдавать прямым методам изменения угла сдвига фаз и угловой частоты скольжения, поскольку косвенным методом, основанным на использовании напряжения биения, присуща низкая точность, особенно сильно проявляющаяся даже при незначительной разности амплитуд синхронизируемых напряжений.

**Выводы.** 1. Для ускорения процесса приведения дизель-инерционных установок гарантированного питания к состоянию синхронизма управления регулятором частоты вращения следует вести ступенчатыми воздействиями, используя для этой цели гидроупор пуска или электромагнитный управляемый золотник, связанный с управляющим поршнем регулятора.

2. Качество электрической энергии в процессе синхронизации зависит от величины угловой ошибки синхронизатора, для уменьшения которой следует применять синхронизаторы с постоянным временем опережения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рогожкин Г.М., Савоськин А.Д., Кононов Б.Т. *Автоматизация СЭС. Учебник для ВВУЗОВ.* – МО СССР, 1983. – 486 с.
2. Кононов Б.Т., Сергеев К.Г., Ильин С.А. *Определение динамических характеристик первичного двигателя дизель-генератора АС-808 // Тематический научно-технический сборник ХВВКУ.* – Х.: ХВВКУ. – 1978. – №322. – С. 45 - 51.
3. А.С. СССР № 455424. *Устройство для автоматической точной синхронизации,* Б.Т. Кононов, А.Е. Церковный, опубликовано в БИ № 48, 1974.
4. А.С. СССР № 30730660. *Способ управления дизель-генераторной установкой.* Б.Т. Кононов, Ю.Г. Васильев, А.Г. Вершинин, 1990.

Поступила 30.07.2002

**КОНОНОВ Борис Тимофеевич,** доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ХВУ. В 1962 году окончил Львовский политехнический институт. Область научных интересов – источники гарантированного питания.

**МАЛЫШ Александр Николаевич,** адъюнкт ХВУ. В 1987 году окончил Рижское ВВПКУ. Область научных интересов – источники гарантированного питания.



---