

ВЫБОР ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Асинхронные генераторные установки являются перспективным источником электроэнергии для электроснабжения судовых механизмов и систем. Основной проблемой, сдерживающей широкое внедрение простых и дешевых асинхронных генераторов, является сложность создания управляемого источника реактивной мощности, необходимого для возбуждения и регулирования напряжения генератора. Развитие микроэлектроники, силовых полупроводников и пленочных конденсаторов переменного тока позволяет создать эффективный регулятор напряжения, состоящий из коммутируемых трехфазных секций конденсаторов. Актуальной задачей становится выбор алгоритма переключения конденсаторных секций для стабилизации напряжения генератора при изменении нагрузки или частоты вращения генератора [1]. Решение задачи создания ступенчатого (дискретного) регулятора напряжения асинхронного генератора предполагает определение эффективного закона управления в классе дискретно-импульсных систем автоматического управления.

Выбор дискретных линейно-импульсных законов управления обоснован тем, что изменение состояния тиристорных устройств синхронизировано с питающим напряжением переменного тока. В этом случае происходит ступенчатое и периодическое, дискретно-импульсное изменение управляющего сигнала, воздействующего на выходное напряжение генератора.

Управляющее воздействие оказывается квантованным по времени с периодом, равным или кратным периоду сети. При этом быстродействие каналов управления генераторов соизмеримо с периодом сети, поэтому должна учитываться дискретность управления по времени.

Параметры переходных процессов в импульсных системах стабилизации напряжения при ступенчатой коммутации нагрузки генератора регламентируются государственными стандартами и требованиями морских классификационных обществ. Ограничения накладываются на провал и заброс напряжения, на время восстановления напряжения и всего переходного процесса [2].

Управление напряжением осуществляется за счет регулирования емкостной статорной нагрузки генератора. Известно [1], что при ступенчатой коммутации нагрузки генератора процесс изменения напря-

жения можно представить в виде двух составляющих: быстрого скачка напряжения за счет изменения энергии в контурах рассеяния статора и ротора и более медленного процесса возбуждения по основному пути магнитного потока генератора. В этом случае передаточная функция генератора по управлению напряжением может рассматриваться как параллельное соединение двух инерционных звеньев, характеризующих процессы возбуждения и рассеяния

$$W_{\bar{a}}(p) = \frac{k_b}{T_g p + 1} + \frac{k_\sigma}{T_\sigma p + 1}. \quad (1)$$

В качестве периода квантования процессов управления в генераторах будем считать период переменного тока T_0 .

Выбор рационального закона управления напряжением асинхронного генератора произведем среди классических линейных импульсных законов управления «П», «И», «ПИ», «ПД» и «ПИД».

Структурная схема системы стабилизации с типовыми дискретно-импульсными законами управления показана на рис. 1. Возмущающее воздействие $f = -k_f \cdot 1(t)$ представляет собой ступенчатую функцию и подается на статорную обмотку генератора, т.е. на вход объекта. В качестве фиксатора S_0 используем два вида преобразователей импульсных сигналов [3]:

$$S_{0и} = \frac{1 - e^{-pT_0}}{p} \quad \text{и} \quad S_{0и} = \frac{1}{p}. \quad (2)$$

Первый фиксатор преобразует импульсную последовательность управляющего сигнала $u^* = u(kT_0)\delta(t - kT_0)$ в кусочно-ступенчатую функцию $u(t) = u(kT_0)$ для интервала времени $kT_0 \leq t \leq (k+1)T_0$, а

второй - в сумму $u(t) = \sum_{i=1}^k u(kT_0)$ для того же интервала

$kT_0 \leq t \leq (k+1)T_0$, т.е. выполняет одновременно функцию интегратора.

С учетом описанных фиксаторов (2) передаточные функции импульсных регуляторов:

$$W_{д'} = \frac{k_{д'}(1 - \hat{I}^{-pT_0})}{p}, \quad W_{\hat{c}} = \frac{k_{\hat{c}}}{p}, \quad W_{д\hat{c}} = \frac{k_{\hat{c}} + k_{д'}}{p}(1 - \hat{I}^{-pT_0}), \quad (3)$$

$$W_{д\hat{a}} = \frac{(1 - \hat{I}^{-pT_0})[k_{д'} + k_{\hat{a}}(1 - \hat{I}^{-pT_0})]}{p},$$

$$W_{д\check{c}a} = \frac{(1 - e^{-pT_0})k_d + k_{\xi} + k_{\check{a}}(1 - e^{-pT_0})}{p}$$

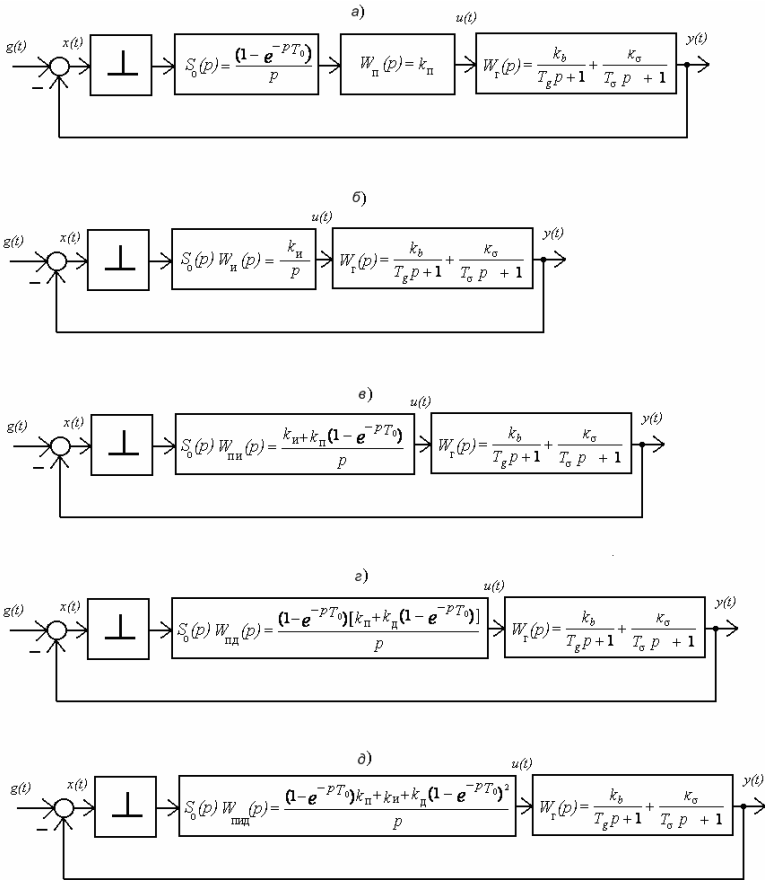


Рис. 1. Структурные схемы дискретной системы стабилизации напряжения судовой электроустановки с асинхронным генератором:
 а) – П-регулятор; б) – И-регулятор; в) – ПИ-регулятором; г) – ПД-регулятором;
 д) – ПИД- регулятором.

Применим дискретное D - преобразование к передаточным функциям разомкнутой системы регулирования напряжением. Воспользуемся методом разложения дробно-рациональных функций на сумму

элементарных дробей [3]:

$$D\left\{\frac{1}{p(Tp+1)}\right\} = D\left\{\frac{1}{p} - \frac{1}{p+1/T}\right\} = \frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0}-1} - \frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0}-e^{-T_0/T}} = \frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0}-1} \cdot \frac{1-e^{-T_0/T}}{e^{pT_0}-e^{-T_0/T}}.$$

$W_{\text{а}}(p)$ - передаточная функция генератора как объекта управления по каналу возбуждения; $W_{\text{и}}(p), W_{\text{и}}(p), W_{\text{ин}}(p), W_{\text{ид}}(p), W_{\text{ид}}(p)$ - передаточные функции импульсного регулятора напряжения;

\perp - импульсный элемент, реализующий импульсное квантование аналогового сигнала;

$S_0(p)$ - фиксатор нулевого порядка, описывающий цифро-аналоговый преобразователь.

Дискретное изображение ступенчатого воздействия [3]

$$F^*(z) = F - \frac{k_f}{1-z^{-1}} = -\frac{k_f z}{z-1},$$

а изображение по Лапласу соответственно равно $F(p) = -\frac{k_f}{p}$.

Получим изображение регулируемой величины

$$y^*(z) = -\frac{D\{F(p)W_{\text{а}}(p)\}}{1+D\{W_{\text{д}}(p)SW_{\text{а}}(p)\}}. \quad (4)$$

Чтобы получить дискретную временную последовательность огибающей регулируемого напряжения генератора на k - шаге $y(kT_0)$, достаточно применить обратное z -преобразование к выражению (4). Для получения оригинала $y(kT_0)$ по его изображению нужно разложить дробно-рациональную функцию (4) в ряд Лорана по отрицательным степеням оператора z . Воспользуемся известным выражением для z - преобразования:

$$y^*(z) = Z[y(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT_0) \cdot z^{-k}.$$

В таком разложении коэффициенты при операторе z^{-k} равны значению решетчатой функции $y(kT_0)$, т.е. пошаговому значению переменной при $t = kT_0$. Разложение дробно-рациональной функции в ряд Лорана можно получить путем алгебраического деления полинома числителя на полином знаменателя.

Определим дискретную передаточную функцию разомкнутой сис-

темы стабилизации напряжения асинхронного генератора в виде параллельного соединением звеньев (1) с пропорциональным регулятором (3)

$$W_{\Pi}^* = D \left\{ \frac{k_{\Pi}(1 - e^{-pT_0})}{p} \cdot \left(\frac{k_b}{\check{N}_g p + 1} + \frac{k_{\sigma}}{\check{N}_{\sigma} p + 1} \right) \right\} = \frac{k_i k_b (1 - e^{-T_0/T_b})}{e^{pT_0} - e^{-T_0/T_b}} + \frac{k_d k_{\sigma} (1 - e^{-T_0/T_{\sigma}})}{e^{pT_0} - e^{-T_0/T_{\sigma}}} = k_i \left(\frac{k_b(1 - d_b)}{z - d_b} + \frac{k_{\sigma}(1 - d_{\sigma})}{z - d_{\sigma}} \right).$$

Здесь введены обозначения: $z = e^{pT_0}$, $d_b = e^{-T_0/T_b}$, $d_{\sigma} = e^{-T_0/T_{\sigma}}$.

Далее получим выражение дискретной замкнутой передаточной функции

$$W_{\text{зп}}^* = \frac{k_{\Pi}[k_b(z - d_{\sigma})(1 - d_b) + k_{\sigma}(z - d_{\sigma})(1 - d_{\sigma})]}{(z - d_b)(z - d_{\sigma}) + k_{\Pi}[k_b(z - d_{\sigma})(1 - d_b) + k_{\sigma}(z - d_{\sigma})(1 - d_{\sigma})]},$$

Подставим в выражение (4) значения импульсных передаточных функций для пропорционального регулятора и асинхронного генератора типа (1) и получим изображение напряжения

$$y_{\Pi}^*(z) = - \frac{z^2 k_f k_0 - z k_f k_{\sigma} d}{z^3 + z^2(k_{\Pi} k_0 - 1 - d_b) + z[d_b - k_{\Pi}(k_0 + k_{\sigma} d_b)] + k_{\Pi} k_{\sigma} d_b}. \quad (5)$$

Построим переходный процесс, принимая следующие значения параметров системы: $k_f = 1$; $k_b = 1$; $k_{\sigma} = 0,1$; $k_{\Pi} = 5$; $\tau = 0,08$. Разделим числитель выражения (5) на знаменатель при выбранных значениях коэффициентов.

$$y_i^*(z) = -0,17z^{-1} - 0,09z^{-2} - 0,170z^{-3} - 0,134z^{-4} - 0,168z^{-5} - 0,153z^{-6} - 0,168z^{-7} \dots$$

Получим управляющее воздействие $u_i^*(z) = -y_i^*(z)W^*(z) = -k_{\Pi}y^*(z)$:

$$u_i^*(z) = 0,885z^{-1} + 0,457z^{-2} + 0,849z^{-3} + 0,668z^{-4} + 0,842z^{-5} + 0,765z^{-6} + 0,842z^{-7} \dots$$

Переходной процесс показан на рис. 2.

Коэффициенты при операторе z^{-k} позволяют определить значения переменных только в дискретные моменты времени, кратные периоду коммутации T_0 . Между коммутациями, при $kT_0 < t < (k+1)T_0$, изменение регулируемой величины $y(t)$ определяется непрерывной передаточной функцией генератора $W_i(p)$.

Дискретное управляющее воздействие $u_{\Pi}(t)$ между коммутациями не изменяется, т.е. $u_{\Pi}(t) = const$ в периоды времени $kT_0 < t < (k+1)T_0$.

Переходные процессы при набросе нагрузки в системе с импульс-

ным И-регулятором могут быть получены аналогично:

$$y_n^*(z) = -\frac{z k_f k_0 - k_f k_\sigma d_b}{z^2 + z (k_n k_0 - 1 - d_b) + d_b - k_n k_\sigma d_b}, \quad (6)$$

$$u_n^*(nT_0) = -k_n \sum_{k=0}^n y(kT_0).$$

На рис. 3 приведен процесс восстановления напряжения асинхронного генератора после включения номинальной нагрузки в системе с интегральным регулятором при разных настроечных коэффициентах регулятора: $k_n = 6,0$ и $k_n = 9,9$. Второе значение k_n является оптимальным по быстродействию.

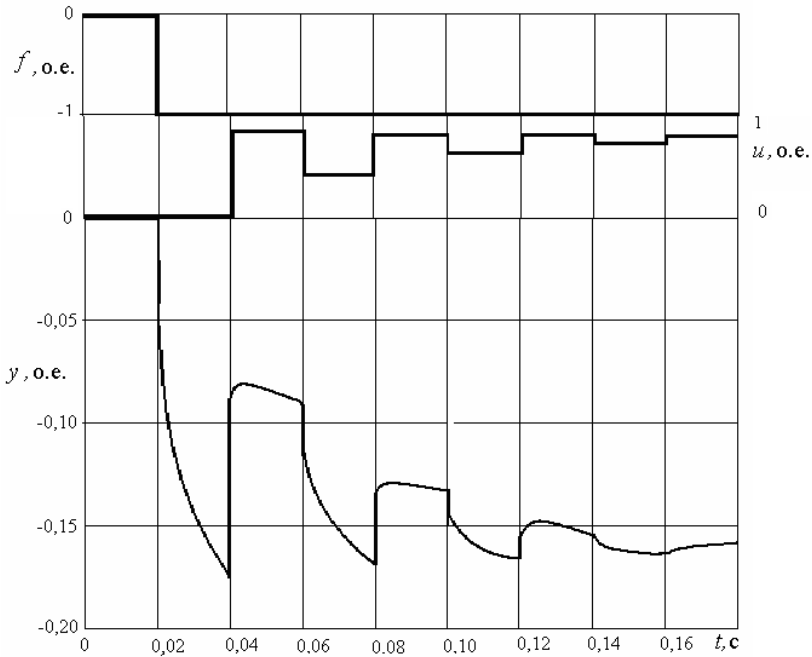


Рис. 2. Переходный процесс в системе регулирования напряжения с импульсным П-регулятором

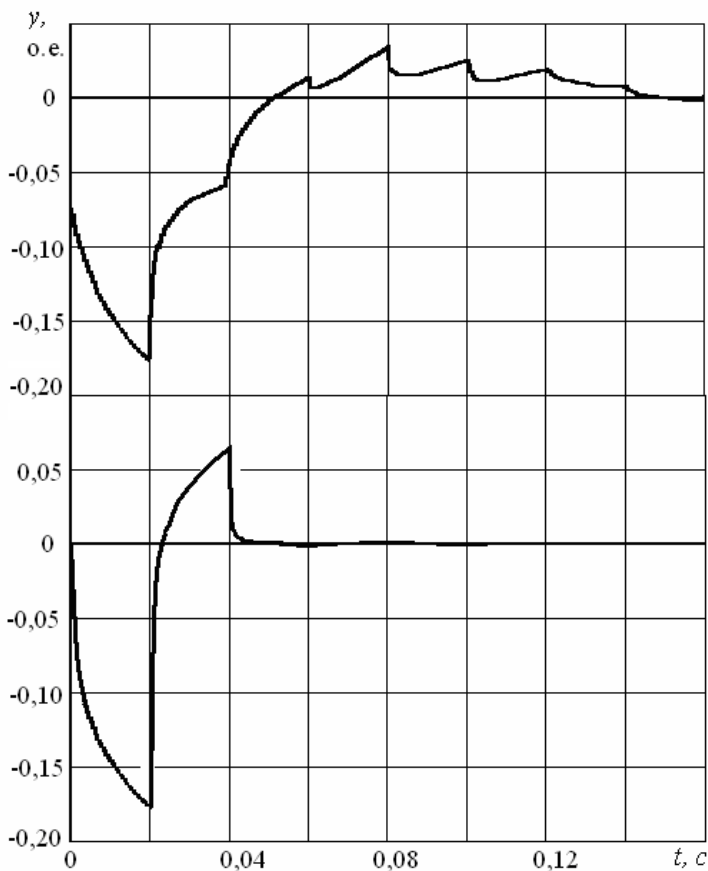


Рис. 3. Переходный процесс в системе регулирования напряжения с импульсным И-регулятором

Переходные процессы в системе регулирования напряжения с импульсным ПИ-регулятором определяются выражениями:

$$y_{\text{пн}}^*(z) = -\frac{z^2 k_f k_0 - z k_f k_{\sigma} d_b}{z^3 + z^2 [(k_{\text{и}} + k_{\text{п}}) k_0 - 1 - d_b] + z [d_b - k_{\text{п}} (k_{\sigma} d_b + k_0) - k_{\text{и}} k_{\sigma} d_b] + k_{\text{п}} k_{\sigma} d_b},$$

$$u_{\text{пн}}^*(nT_0) = -k_{\text{п}} y(nT_0) - k_{\text{и}} \sum_{k=0}^n y(kT_0). \quad (7)$$

При использовании ПД-регулятора процесс определяется выражениями:

$$y_{нд}^*(z) = \frac{z^3 k_f k_0 - z^2 k_f k_\sigma d_b}{z^4 + z^3 a + z^2 b + z c + r}; a = (k_n + k_d) k_0 - 1 - d_b; \quad (8)$$

$$b = d_b(1 + k_d k_\sigma) - (k_n + 2k_d)(k_0 + k_\sigma d_b); c = (k_n + 2k_d) k_\sigma d_b + k_d k_0; r = -k_d k_\sigma d_b,$$

$$u_{нд}^*(nT_0) = -k_n y(nT_0) - k_d [y(nT_0) - y((n-1)T_0)].$$

На рис. 2 и 3 показаны переходные процессы в генераторе с параметрами, когда комплексные корни годографов $z = f(k_n)$ находятся только в I и IV квадрантах комплексной плоскости.

На рис. 4 и 5 построены переходные процессы в системах с П-, И-, ПИ- и ПД- регуляторами для генератора со следующими параметрами: $k_f = 1$; $k_b = 2,03$; $k_\sigma = 0,086$; $\tau = 0,2$. При этих параметрах комплексные корни годографов $z = f(k_n)$ находятся во всех квадрантах комплексной плоскости, а ПИ-регулятор является оптимальным.

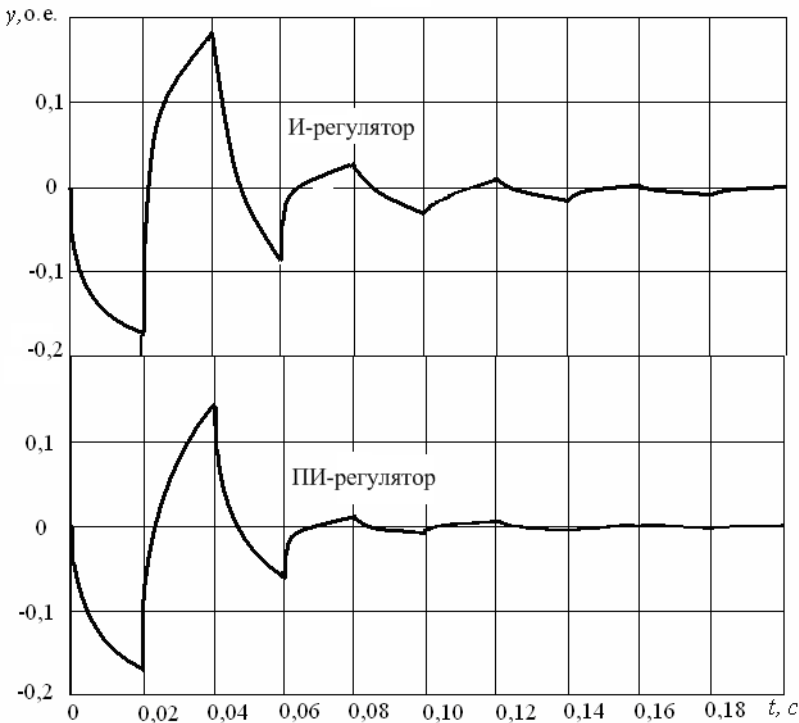


Рис. 4. Переходные процессы в системах: И, ПИ-регулятор

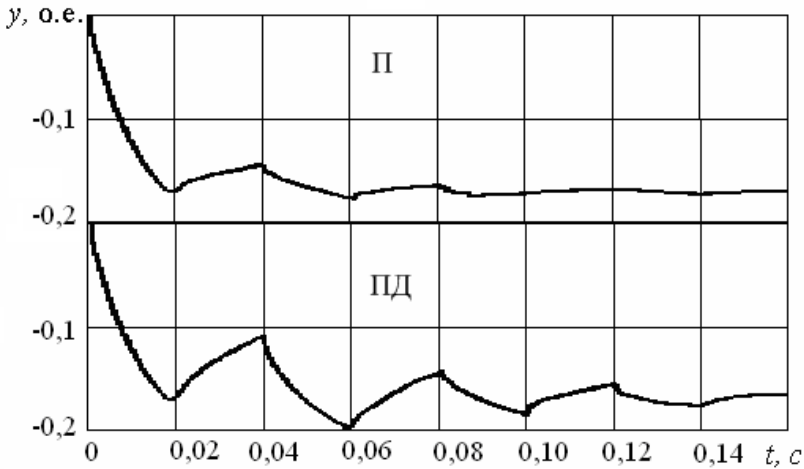


Рис. 5. Переходные процессы в системах с П и ПД-регулятором

Таким образом пропорциональный импульсный регулятор асинхронного генератора не обеспечивает требуемой точности стабилизации напряжения, а при увеличении коэффициента усиления приводит к колебательности, а затем к неустойчивости системы.

Использование дифференцирующей составляющей для генераторов нецелесообразно. Введение Д-звена раскачивает систему, делая её более колебательной. Быстрая реакция генератора на возмущение (нагрузку) позволяет без дифференцирования определить необходимость форсировки возбуждения генератора по интенсивному провалу напряжения при перегрузках.

Наилучшие переходные процессы достигаются при использовании импульсного И- или ПИ-регулятора в зависимости от параметров асинхронного генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. – Киев–Одесса: Лыбидь, 1990. – 168 с.
2. Правила технической эксплуатации морских и речных судов // Нормативные документы морского транспорта Украины. – Том 2. - Одесса, 2000. - 405 с.
3. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. - М.: Наука, 1977. - 560 с.