

УДК 681.537

**Вишнеvский Дмитрий Леонидович**, магистр

Одесская национальная морская академия, г. Одесса, Украина, ул. Тенистая, д. 5, кв. 27, г. Одесса, Украина,  
[d.vyshnevsky@gmail.com](mailto:d.vyshnevsky@gmail.com), т. 0932189877

### ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

*Проведена оптимізація закону регулювання напруги асинхронного генератора шляхом визначення настроювальних параметрів цифрового регулятора на підставі математичної моделі асинхронного генераторного комплексу. Застосування даного закону при проектуванні судових асинхронних генера-роторних комплексів дозволить вирішити проблему регулювання напруги асинхронного генератора.*

**Ключевые слова:** индукционный генератор, математическая модель, закон регулирования напряжения, определение параметров регулятора.

**Вишнеvський Дмитро Леонідович**, магістр

Одеська національна морська академія, м. Одеса, Україна, вул. Теніста, б. 5, кв. 27, м. Одеса, Україна  
[d.vyshnevsky@gmail.com](mailto:d.vyshnevsky@gmail.com), т. 0932189877,

### ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАКОНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

*Произведена оптимизация закона регулирования напряжения асинхронного генератора путем определения настроечных параметров цифрового регулятора на основании математической модели асинхронного генераторного комплекса. Применение данного закона при проектировании судовых асинхронных генераторных комплексов позволит решить проблему регулирования напряжения асинхронного генератора.*

**Ключові слова:** індукційний генератор, математична модель, закон регулювання напруги, визначення параметрів регулятора.

**Vyshnevskiy Dmitriy Leonidovich**, The master

Odesskaya morskaya akademiya, Odessa, Ukraina, Tenista st., 5, kv. 27, Odessa, Ukraina,  
[d.vyshnevsky@gmail.com](mailto:d.vyshnevsky@gmail.com), tel. 0932189877,

### OPTIMIZING THE LAWS REGULATING THE VOLTAGE INDUCTION GENERATOR

*This article gives an optimization of the law regulating the voltage of the asynchronous generator by determining the tuning parameters of the digital controller based on the mathematical model of the asynchronous generator complex. The application of this law in the design of autonomous asynchronous generator systems will solve the problem of voltage regulation of asynchronous generator.*

**Keywords:** induction generator, mathematical model, law regulating the voltage, determination of the controller parameters.

#### Введение

На судах торгового флота источником электрической энергии до настоящего времени остается синхронный генератор (СГ), бесконтактное исполнение которого усложняет конструкцию генератора, увеличивает его массу и стоимость. Альтернативой СГ является асинхронный генератор (АГ) с короткозамкнутым ротором. Сложность применения АГ заключается в необходимости иметь управляемый источник реактивной мощности для возбуждения и регулирования напряжения. Одна из нерешенных проблем – оптимизация закона управления реактивным источником.

#### Основной материал

В разрабатываемой цифровой системе стабилизации напряжения (рис. 1) используется пять трехфазных секций конденсаторов, четыре из которых коммутируются при помощи тиристорных ключей. Подключение секции управляется четырехразрядным двоичным числом, поэтому величины коммутируемых емкостей соотносятся как (1:2:4:8). Количество разрядов цифрового регулятора определяется точностью регулирования и величиной коммутируемой емкости. Необходимая емкость возбуждения конденсаторов зависит от характера нагрузки генератора. Цифровой регулятор напряжения реализован на базе контроллера Atmega8.

На основании принципиальной схемы была составлена функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения и частоты вращения асинхронного генератора (рис. 2).

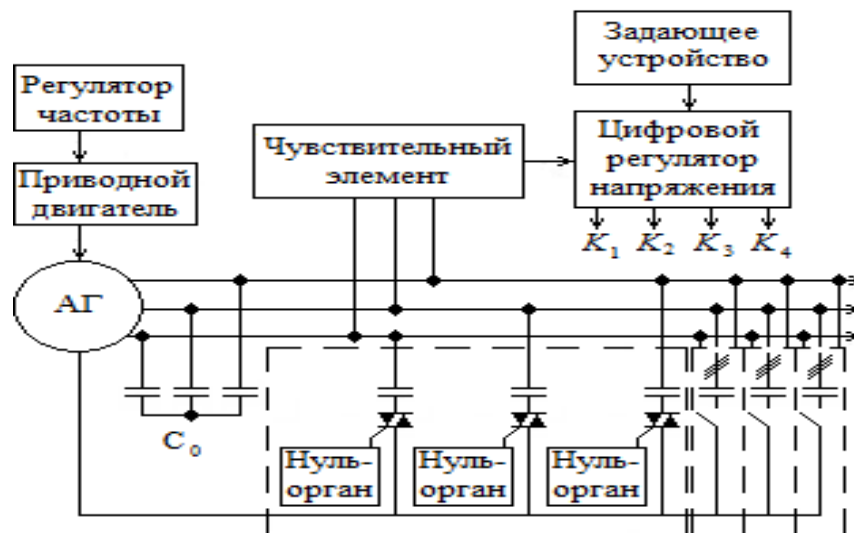


Рис. 1. Принципиальная схема судового асинхронного генераторного комплекса

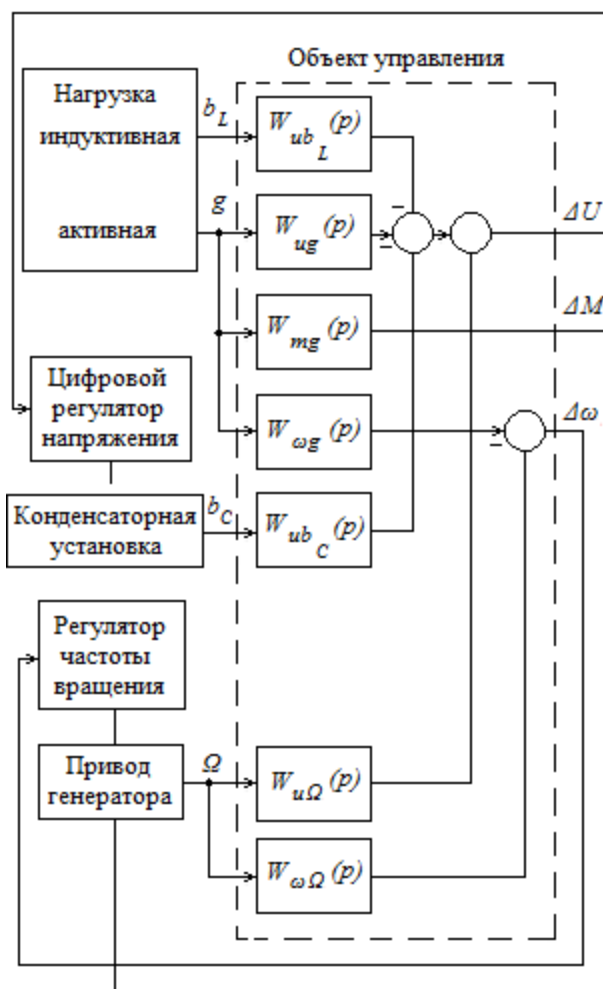


Рис. 2. Функциональная схема САУ напряжения и частоты вращения асинхронного генератора

Активно-индуктивные потребители электроэнергии генератора являются его возмущающим воздействием, в качестве параметров которых можно выбрать проводимости активной  $g$  и реактивной  $b_L$  составляющих нагрузки генератора.

Активная нагрузка генератора  $g$  создает тормозной момент  $\Delta M$ , влияющий на приводной двигатель.

Для получения характеристик АГ как объекта управления использованы экспериментальные и теоретические исследования [4–6].

Передаточная функция АГ представлена как параллельное соединение инерционного и безынерционных звеньев,

$$W_{ub} = \frac{k_b}{T_g p + 1} + k_\sigma + k_L \quad (1)$$

При набросе нагрузки возникает мгновенный провал напряжения, который использован для определения необходимого управляющего воздействия цифрового регулятора в течение первого периода переменного напряжения (за 20 мс).

Проведенные исследования [4] показали, что для управления напряжением АГ целесообразно использовать дискретный интегральный закон управления, который получен путем дискретизации по уровню линейно-импульсного закона регулирования напряжения.

Выходными регулируемым параметрами генератора являются отклонение максимума амплитуды действующего значения напряжения переменного тока  $\Delta U$  и частоты тока  $\Delta \omega$  от

номинальных значений.

Управление напряжением и частотой тока в асинхронном короткозамкнутом генераторе с конденсаторным возбуждением осуществляется путем изменения емкостного тока (проводимости конденсаторов возбуждения  $b_c$ ) и частоты вращения ротора генератора  $\Omega$ .

Реализация интегрального закона выполнена по рекуррентной зависимости:

$$C_n = C_{n-1} + \Delta C_n = C_{n-1} + k \cdot \Delta U_n, \quad (2)$$

где  $\Delta U_n = U_3 - U_n$  – разница заданного и измеренного максимумов напряжения в процентах;

$U_n$  – максимум напряжения на текущем шаге;

$U_3$  – заданный максимум напряжения;

$C_{n-1}$  – суммарная емкость на предыдущем периоде напряжения;

$C_n$  – суммарная емкость на текущем периоде напряжения;

$k$  – коэффициент, определяющий скорость интегрирования (суммирования) отклонения  $\Delta U_n$ , является настроечным параметром регулятора.

Реализация линейно – импульсного закона в конденсаторной установке с четырьмя секциями конденсаторов выполнена путем его преобразования в четырехразрядный цифровой закон управления. Это преобразование показано на рис. 3.

На контроллере Atmega8 составлена программа измерения напряжения с помощью восьмиразрядного АЦП, выполнен расчет необходимого управляющего воздействия  $C_n$ , а также преобразование 8миразрядного кода в четырехразрядное двоичное число по количеству коммутируемых секций конденсаторов.

Выше и ниже номинального значения формируется по 15 зон отклонений напряжений. В зависимости от попадания максимума напряжения в определенную зону формируется соответствующее 4хразрядное управляющее число.

Для устранения автоколебаний при дискретном регулировании необходимо вводить зону нечувствительности, которая будет больше реакции объекта на действие младшего разряда регулятора, поэтому зона нечувствительности является вторым настроечным параметром цифрового регулятора.

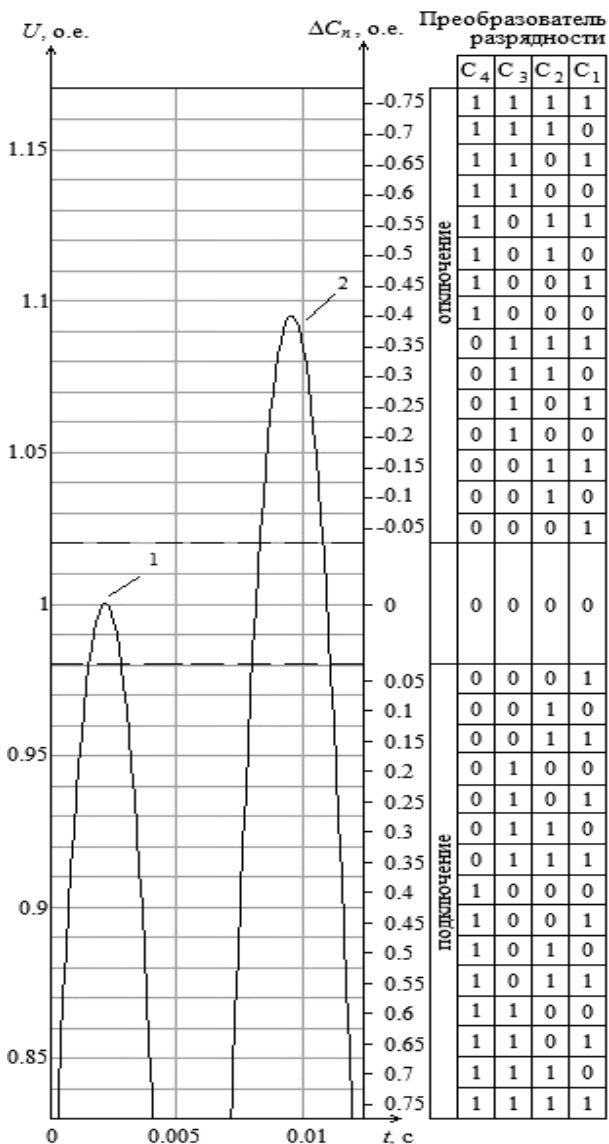


Рис. 3. Преобразование линейно-импульсного закона управления в четырехразрядный цифровой закон управления

Математическая модель асинхронной генераторной установки [2, 3], построенная на основании функциональной схемы (рис. 2). включает в себя следующие уравнения: асинхронной машины с короткозамкнутым ротором; регулятора напряжения генератора (2);

активной и реактивной нагрузки АГ;

приводного двигателя внутреннего сгорания и регулятора частоты вращения.

Уравнения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором записываются в системе координат  $(\alpha, \beta)$  в виде, удобном для численного решения, т. е. относительно первых потокоцеплений и относительно токов в алгебраических уравнениях для случая симметричной нагрузки генератора [9]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{d\tau} &= -u_{\alpha} - r_s i_{\alpha}; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{d\tau} &= -u_{\beta} - r_s i_{\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\tau} &= -\omega_r \psi_{r\beta} - r_r i_{r\alpha}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{d\tau} &= \omega_r \psi_{r\alpha} - r_r i_{r\beta}; \\ i_{\alpha} &= [(L_m + L_{s\sigma})\psi_{s\alpha} - L_m \psi_{r\alpha}] / \Delta; \\ i_{\beta} &= [(L_m + L_{s\sigma})\psi_{s\beta} - L_m \psi_{r\beta}] / \Delta; \\ i_{r\alpha} &= [(L_m + L_{r\sigma})\psi_{r\alpha} - L_m \psi_{s\alpha}] / \Delta; \\ i_{r\beta} &= [(L_m + L_{r\sigma})\psi_{r\beta} - L_m \psi_{s\beta}] / \Delta; \\ \Delta &= (L_{s\sigma} + L_{r\sigma})L_m + L_{s\sigma}L_{r\sigma}, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$  – проекции вектора потокоцепления статора и ротора на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$i_{\alpha}, i_{\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  – проекции вектора тока статора и ротора на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$u_{\alpha}, u_{\beta}$  – проекции вектора напряжения статора на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$  – индуктивности контуров рассеяния статора и ротора;

$L_m$  – индуктивность основного контура намагничивания;

$\omega_r$  – частота вращения ротора.

Активная и реактивная нагрузка генератора моделируется как векторное операторное уравнение связи статорного тока и напряжения, представленное в виде системы дифференциальных уравнений Коши:

$$\begin{aligned} \frac{du_{\alpha}}{d\tau} &= \frac{1}{C}(i_{\alpha} - i_{L\alpha} - gu_{\alpha}); \\ \frac{du_{\beta}}{d\tau} &= \frac{1}{C}(i_{\beta} - i_{L\beta} - gu_{\beta}); \\ \frac{di_{L\alpha}}{d\tau} &= \frac{u_{\alpha}}{L}; \quad \frac{di_{L\beta}}{d\tau} = \frac{u_{\beta}}{L}, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $g, L, C$  – активная проводимость, индуктивность и емкость нагрузки.

Уравнения приводного двигателя внутреннего сгорания описываются дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega_r}{d\tau} &= M_m - M_g; \\ M_g &= \text{Re}(\bar{\Psi}_s) \cdot \text{Im}(\bar{I}_s) - \text{Im}(\bar{\Psi}_s) \cdot \text{Re}(\bar{I}_s), \end{aligned} \tag{5}$$

где  $M_g$  – электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором;

$M_m = f(\omega_r, p_1, \dots, p_n, \tau)$  – механический момент приводного двигателя;

$J$  – момент инерции вала двигателя и ротора генератора;

$p_i$  – параметры двигателя.

Уравнение динамики пропорционального регулятора частоты вращения представлено в виде:

$$T_f \cdot \frac{dh}{dt} + h = k_f \cdot \Delta\omega, \quad (6)$$

где  $k_f$  – коэффициент усиления регулятора;

$T_f$  – постоянная времени регулятора;

$\Delta\omega$  – изменение частоты вращения;

$h$  – положение топливной рейки.

Для исследования переходных процессов и выбора настроечных параметров регулятора используется программа на языке Pascal [7, 8], составленная на основании математической модели.

Были учтены требования к статическим и динамическим характеристикам судовой системы стабилизации напряжения, относящейся к классу автоматизации G2 [1].

С целью оптимизации закона управления (2) осуществим выбор настроечного параметра  $k$ , при котором будут выполнены все требования к напряжению и будет обеспечено минимальное динамическое отклонение напряжения от заданного, минимальное установившееся отклонение напряжения и время регулирования.

Для этого выполнено моделирование включения активно-индуктивной нагрузки на АГ и исследование переходных процессов в САР напряжения АГ. На приведенных графиках (рис. 4 и рис. 5) показаны изменения модуля вектора напряжения  $U_m$ , и моментов  $M_g$  и  $M_d$  в дизель-генераторе.

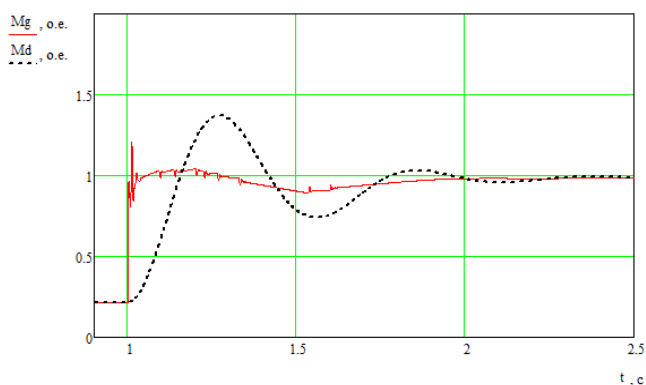


Рис. 4. Изменения модуля вектора напряжения при включении активно-индуктивной нагрузки от 25 % до 100 %

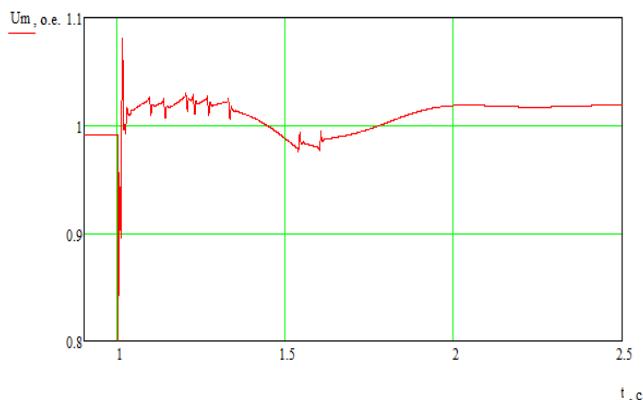


Рис. 5. Изменение моментов двигателя и генератора при коммутации нагрузки

Процедура измерения максимума фазного напряжения  $U_{dat}$  показана на рис. 6.

Процесс изменения емкости возбуждения  $C_n$  осуществляется в моменты, когда напряжение датчика  $U_{dat}$  остается неизменным.

Выполним исследование переходных процессов в САР напряжения АГ при варьировании коэффициенте усиления  $k$  от 1/3 (рис. 7) до 1 и постоянной величины зоны нечувствительности  $\Delta = \pm 2\%$ .

При увеличении  $k$  время переходного процесса  $t_n$  и перерегулирование уменьшаются.

Далее при фиксированном значении коэффициента усиления  $k$  исследованы переходные процессы в САР при варьировании величины зоны нечувствительности от 1 % до 3 %.

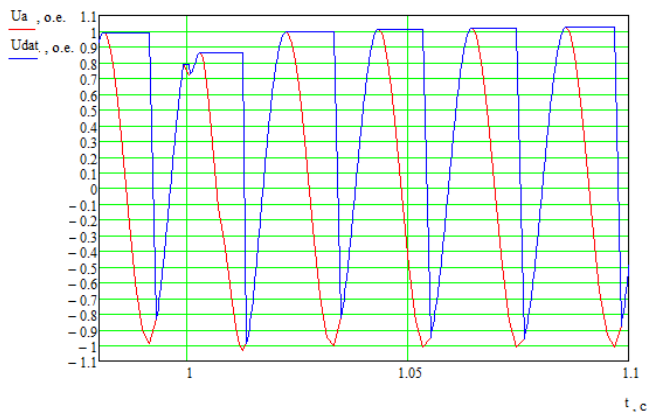


Рис. 6. Процедура измерения максимума напряжения фазы  $\alpha$

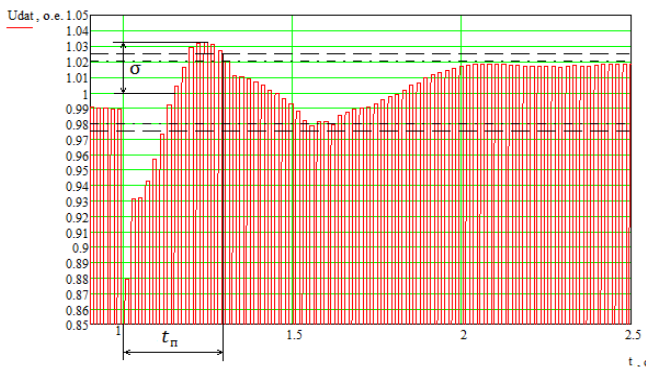


Рис. 7. Переходной процесс в САР при  $k = 1/3$ ,  $\Delta = \pm 2\%$

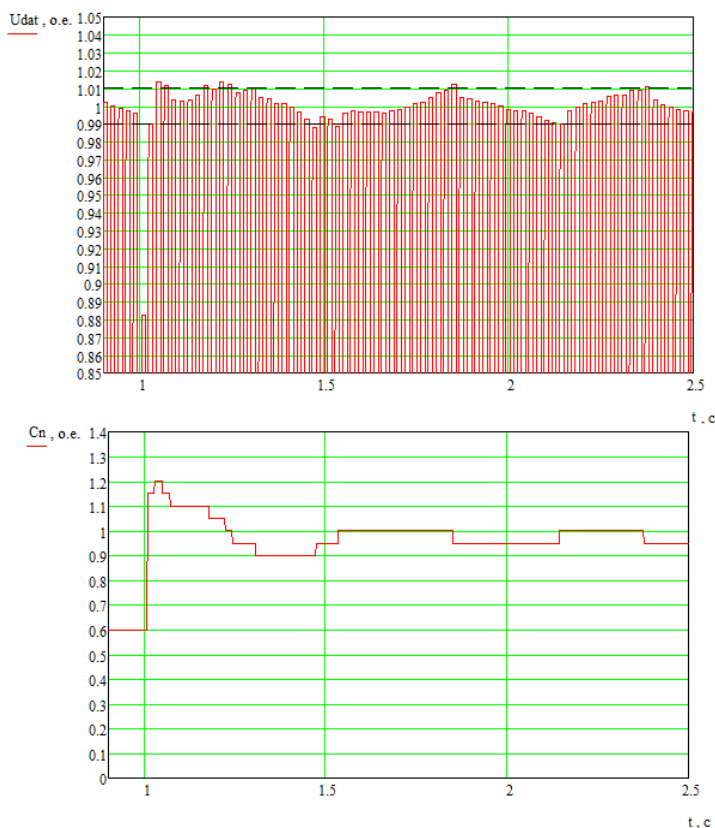


Рис. 8. Переходной процесс в САР и изменение регулирующего воздействия  $C_n$  при  $k=1$ ,  $\Delta = \pm 1\%$ ,

Величина зоны нечувствительности в 3 % не обеспечивает требуемого установившегося отклонения напряжения в 2,5 %, а зона нечувствительности в 1 % приводит к модуляции напряжения (рис. 8), поэтому выбираем зону нечувствительности  $\Delta = \pm 2\%$ .

На рис. 9 показан оптимальный переходной процесс, выбранные настроечные параметры: зона нечувствительности  $\Delta = \pm 2\%$ , коэффициент усиления  $k = 1$ , при этом время переходного процесса  $t_n$  составило 0,03 с, перерегулирование  $\sigma = 0$ .

Временем переходного процесса  $t_n$  принято время вхождения напряжения в диапазон требуемого установившегося отклонения напряжения  $\Delta = \pm 2,5\%$ . Переходное отклонение напряжения при набросе и сбросе нагрузки за время исследования не превысило  $k=1$  14 % и не зависело от параметров регулятора, а определяется величиной коммутируемой нагрузки.

Время переходного процесса при правильно выбранных настройках регулятора составляет 1 – 2 периода переменного напряжения, что практически невозможно для СГ из-за их инерционности по каналу управления. В АГ каналом управления и каналом возмущения является статорная обмотка, что позволяет создать практически инвариантную систему управления напряжением.

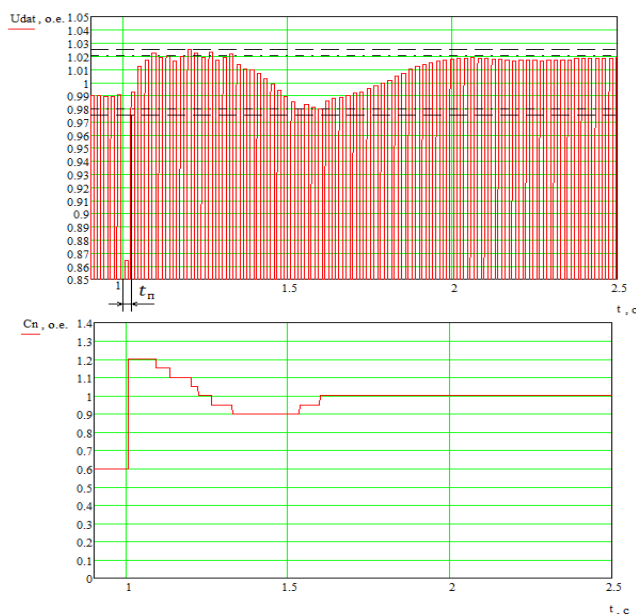


Рис. 9. Оптимальный переходной процесс в САР и изменение регулирующего воздействия  $C_n$  при  $k = 1$ ,  $\Delta = \pm 2\%$

### Выводы

Выполненное моделирование процессов управления напряжением асинхронного генератора с разработанным регулятором позволило определить настройки цифрового регулятора (коэффициент усиления регулятора  $k = 1$ , зона нечувствительности  $\Delta = \pm 2\%$ ), обеспечивающие оптимальное качество переходных процессов: минимальное время регулирования в течение одного периода (0,02 с) при динамическом отклонении напряжения – 14 %, без перерегулирования, что значительно превосходит требования, установленные стандартом ISO 8528-1:2005.

### Список литературы

1. ISO 8528-1:2005. Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания.
2. Важнов Д. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
3. Вишнеvский Л. В., Мироненко В.П. Универсальная математическая модель генератора переменного тока // Изв. ВУЗ Электромеханика. – 1986. – № 3. – С. 33–40.
4. Дао Минь Куан. Совершенствование режимов работы судового асинхронного дизель-генератора: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – О., 2011. – 153 с.
5. Кицис С.И. Исследование регулировочных свойств асинхронного генератора // Электричество. – 1980. – № 2. – С. 36–41.
6. Кицис С. И. К исследованию процессов установления при самовозбуждении асинхронных машин // Изв.АН СССР Энергетика и транспорт, 1971. – № 4. – С. 147–153.
7. Пасс А. Е., Вишнеvский Л. В. Исследование динамики асинхронного самовозбуждающегося генератора вблизи установившегося состояния // Изв. ВУЗ Электромеханика, 1980. – № 6. – С. 591–596.
8. Пасс А. Е., Вишнеvский Л. В. Расчет коэффициентов передачи асинхронного самовозбуждающегося генератора // Электромашиностроение и электрооборудование. – К.: Техника, 1981. – Вып.33. – С. 84–89.
9. Трещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

### Referenses

1. ISO 8528-1:2005. Units alternating current driven by reciprocating internal combustion engines.
2. Vazhnov D. I. Transients in AC machines. - L. Energy, 1980. – 256 p..
3. Vyshnevsky L. V., Myronenko V. P. Universal mathematical model of the alternator// Math. Electromechanics University. – 1986. – № 3. – P. 33–40.
4. Dao Ming Kuan. Improving asynchronous modes ship diesel generator: dis. ... Cand. tehn. Sciences: 05.05.03. – O., 2011. – 153 p.
5. Kitsis S.I. Study adjusting properties of asynchronous generator // Electricity. – 1980. – № 2. – P. 36–41.
6. Kitsis S.I. To study the processes of establishing self-excitation in induction machines // Math. USSR Academy of Energy and Transport, 1971. – № 4. – P. 147–153.
7. Pass A. E., Vyshnevsky L. V. Study of the dynamics of the self-induction generator near steady state // Math. Electromechanics University, 1980. – № 6. – P. 591–596.
8. Pass A.E., Wisniewski L.V. Calculation of transmission coefficients of the self-induction generator // Electrical Machinery and Electrical Equipment. - K.: Technology, 1981. – № 33. – P. 84–89.
9. Treshchev I. I. Electromechanical processes in AC machines. – L. : Energy, 1980. – 256 p.

Поступила в редакцию 01.11 2014 г.