

УДК 621.313.3:517.977.5

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В.В. Карагодин, В.А. Горин, Е.П. Вишняков  
(Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского)

*Предлагается подход к определению начальных приближений сопряжённых переменных, гарантирующих сходимость итерационных процедур нахождения оптимального по быстродействию управления возбуждением синхронных генераторов с диодным бесщёточным возбудителем, который позволит обеспечить реализацию оптимального регулирования в масштабе реального времени, тем самым повышая качество переходных процессов.*

**Ключевые слова:** автономная система электроснабжения, синхронный генератор, оптимальное управление, экстремальная задача, метод Ньютона, начальные приближения.

### Введение

Для повышения уровня надёжности электропитания особо ответственных потребителей специальных объектов Министерства обороны (МО) применяются автономные источники электроснабжения на базе дизельных электростанций, от надёжной работы которых во многом зависит успешное выполнение стоящих задач.

Вместе с тем большинство ответственных потребителей специальных объектов для нормальной работы требуют не только высокой надёжности и бесперебойности электроснабжения, но и высокого качества электроэнергии во всех режимах работы. Понятие качества электроэнергии при этом, кроме требований к точности поддержания напряжения, включает также требования к качеству переходных процессов. Для потребителей, чувствительных к изменению напряжения, необходимо, чтобы переходные процессы протекали с небольшим числом колебаний напряжения и заканчивались достаточно быстро как при малых, так и при больших возмущениях. Следует подчеркнуть, что требования к качеству электроэнергии постоянно повышаются.

Вышеуказанные обстоятельства приводят к повышению требований к регулированию и управлению автономными источниками электроэнергии. Это приводит к необходимости изучения и исследования более совершенных законов регулирования.

В связи с этим значительный интерес представляют оптимальные законы управления, позволяющие обеспечить наибольшую эффективность процессов регулирования.

Исключительное место в теории оптимального управления занимает проблема предельного быстродействия. Время перевода объекта из одних режимов в другие является одним из основных показателей

качества систем управления. Системы, оптимальные по быстродействию, кроме обеспечения минимума времени переходного процесса, в ряде случаев обеспечивают высокую динамическую точность.

Большую пользу можно извлечь из аperiodичности оптимальных по быстродействию переходных процессов. Отсутствие перерегулирований «переходных функций» (реакций на скачок входного задающего сигнала при установившемся начальном состоянии) систем, оптимальных по быстродействию, позволяет использовать в качестве рабочих режимы, расположенные вблизи границ области допустимых состояний. Часто именно эти режимы и являются наиболее эффективными.

Велика роль задачи синтеза систем, оптимальных по быстродействию, и при проектировании систем управления. Решение этой задачи позволяет находить минимальную продолжительность переходных процессов. Информация об этом времени, которое является обобщённым показателем качества, играет большую роль как при формировании задания на проектирование, так и при оценке качества самого проектирования системы управления. Системы, оптимальные по быстродействию, служат своеобразным эталоном для объективной количественной оценки качества существующих и проектируемых систем управления.

Исследование возможности применения оптимальных по быстродействию алгоритмов регулирования весьма актуально в частности для синхронных генераторов с диодным бесщёточным возбудителем. Наличие в цепи управления диодной бесщёточной системы инерционного возбудителя снижает быстродействие системы и приводит к ухудшению качества напряжения в автономной системе электроснабжения.

Упрощённая математическая модель синхронного генератора с диодным бесщёточным возбудителем может быть представлена системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка [1]:

$$\dot{x}_1 = -\frac{(1+k_2-k_1k_q)}{T_d^H}x_1 + \frac{k_1}{T_d^H}x_2; \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{k_q}{T_{B1}}x_1 - \frac{1}{T_{B1}}x_2 + \frac{k_zk_y}{T_{B1}}\Theta, \quad (2)$$

где  $x_1, x_2$  – переменные состояния;  $x_1 = e_q; x_2 = e'_{db}; e_q$  – э.д.с генератора;  $e'_{db}$  – э.д.с за переходным сопротивлением возбудителя;  $k_z, k_1, k_2, k_q, k_y$  – коэффициенты передачи модели;  $T_{B1}, T_d^H$  – постоянные времени возбудителя и генератора;  $\Theta$  – управляющее воздействие (скважность регулирующих импульсов на выходе регулятора).

Особенностью данной математической модели является зависимость отдельных параметров от переменных состояния  $x_1, x_2$ . Для удобства дальнейшего изложения введём обозначения для таких параметров модели:

$$k_q = f_q(x_1, x_2); (1+k_2-k_1k_q) = f_2(x_1, x_2); k_1 = f_1(x_1, x_2); T_d^H = f_t(x_1).$$

Тогда уравнения (1), (2) можно представить в виде

$$\dot{x}_1 = \frac{f_1(x_1, x_2)}{f_t(x_1)}x_2 - \frac{f_2(x_1, x_2)}{f_t(x_1)}x_1; \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{f_q(x_1, x_2)}{T_{B1}}x_1 - \frac{1}{T_{B1}}x_2 + \frac{k_zk_y}{T_{B1}}\Theta.$$

Задача оптимального быстрогодействия для синхронного генератора с диодным бесщёточным возбудителем формулируется следующим образом. Задан объект, который в упрощённом виде может быть описан системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка (3).

Среди допустимых управлений требуется определить управление  $\Theta(t)$ , переводящее объект (3) из начального состояния  $\mathbf{x}(0)$  в конечное  $\mathbf{x}(T_k)$ , которому соответствует значение напряжения генератора  $u_r = u_{r,ном}$ , за минимально возможное время, т. е. минимизирующее функционал, оценивающий качество процесса:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, \Theta) = \int_{t_0}^{t_k} f_0(x, \Theta) dt \int_{t_0}^{t_k} dt = t_k - t_0 = T_k. \quad (4)$$

В этом случае подынтегральная функция  $f_0(x, \Theta) \equiv 1$ . Время переходного процесса не фиксировано.

При этом на величину управляющего воздействия  $\Theta$  наложены ограничения

$$0 = \Theta_{min} < \Theta < \Theta_{max} = 1. \quad (5)$$

**Синтез оптимального управления.** Данная задача может быть решена с помощью принципа максимума Понтрягина.

Функция Гамильтона  $H$  для рассматриваемой задачи имеет вид

$$H = \sum_{i=1}^2 \psi_i \dot{x}_i = \psi_1 \frac{f_1(x_1, x_2)}{f_t(x_1)}x_2 - \psi_1 \frac{f_2(x_1, x_2)}{f_t(x_1)}x_1 + \psi_2 \frac{f_q(x_1, x_2)}{T_{B1}}x_1 - \psi_2 \frac{1}{T_{B1}}x_2 + \psi_2 \frac{k_zk_y}{T_{B1}}\Theta. \quad (6)$$

Сопряжённую систему уравнений для вспомогательных переменных  $\psi(t)$

$$\frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, (i=1, 2)$$

можно записать следующим образом:

$$\dot{\psi}_1 = f_{11}(x_1, x_2)\psi_1 + f_{12}(x_1, x_2)\psi_2; \quad (7)$$

$$\dot{\psi}_2 = f_{21}(x_1, x_2)\psi_1 + f_{22}(x_1, x_2)\psi_2,$$

где  $f_{11}(x_1, x_2) = -x_2 \frac{d(f_1/f_t)}{dx_1} + \frac{d(x_1 f_2/f_t)}{dx_1};$

$$f_{12}(x_1, x_2) = -\frac{1}{T_{B1}} \frac{d(x_1 f_q)}{dx_1};$$

$$f_{21}(x_1, x_2) = -\frac{1}{f_t} \frac{\partial(x_2 f_1)}{\partial x_2} + \frac{x_1}{f_t} \frac{\partial f_2}{\partial x_2};$$

$$f_{22}(x_1, x_2) = -\frac{1}{T_{B1}} x_1 \frac{\partial(f_q)}{\partial x_2} + \frac{1}{T_{B1}}.$$

Для оптимальности по быстродействию управления  $\Theta(t)$  и траектории  $\mathbf{x}(t)$  необходимо существование такой ненулевой непрерывной функции  $\psi(t)$ , удовлетворяющей системе уравнений (7), что:

– для всех  $t \in [t_0, t_k]$  функция  $H(\psi, \mathbf{x}, \Theta)$  достигает по  $\Theta$  максимума:

$$H(\psi, \mathbf{x}, \Theta) = M(\psi(t), \mathbf{x}(t)); \quad (8)$$

– в конечный момент времени  $t_k$  выполняется соотношение

$$M(\psi(t_k), \mathbf{x}(t_k)) \geq 0. \quad (9)$$

Далее оказывается, что если функции  $\psi(t)$ ,  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\Theta(t)$  удовлетворяют уравнениям сопряжённой системы (7) и условию (8), то функция  $M(\psi(t), \mathbf{x}(t))$  – постоянна. В связи с этим проверку выполнения условия (9) можно производить в любой момент времени  $t \in [t_0, t_k]$ .

Исходя из этого, оптимальное управление определяется из (6) с учётом (5) как

$$\Theta = \Theta_{\max}(0,5 + 0,5\text{sign}(\psi_2)). \quad (10)$$

Отсюда следует, что оптимальное управление возбуждением синхронного генератора является релейным, т. е. представляет собой последовательность интервалов предельной форсировки и расфорсировки возбуждения генератора.

Принцип максимума Л.С. Понтрягина позволяет сформулировать некоторую краевую задачу. Искомая экстремаль должна содержаться среди решений этой краевой задачи. Решение краевой задачи представляет определённые сложности и требует применения численных методов.

В соответствии с (7) и (10) задача определения оптимального управления фактически сводится к отысканию начального вектора  $\psi(0)$ , соответствующего заданным граничным условиям  $\mathbf{x}(t_0)$ ,  $\mathbf{x}(t_k)$ .

Решение такой задачи может быть представлено в виде процедуры, состоящей из следующих шагов [2].

*Шаг 1.* Тем или иным способом задаются некоторыми начальными значениями  $\psi(0) = \psi^0$  для вектор-функции  $\psi(t)$ , которые определяют закон управления (10).

*Шаг 2.* С начальными условиями  $\psi_i(0)$  и  $x_i^0$  решается задача Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (3) в прямом времени от  $t_0$  до  $t_k$ , используя начальное приближение для  $\Theta(t)$ , полученное на предыдущем шаге. В результате находится функция  $\mathbf{x}(t)$ , соответствующая начальным условиям  $\psi^0$ .

При выполнении данного шага возникает трудность построения вычислительной процедуры, поскольку в рассматриваемой задаче время не фиксировано, связанная с тем, что неизвестен момент окончания процесса численного интегрирования.

Выбрать момент окончания процесса численного интегрирования можно различными способами. Момент окончания процесса интегрирования  $t_k$  можно выбирать из условия необходимости для оптимального управления  $(n - 1)$  переключения.

За  $t_k$  можно принимать момент попадания одной из фазовых координат, в случае её монотонного

изменения, в заданную конечную точку.

Можно также воспользоваться рекомендациями, изложенными в [2].

*Шаг 3.* Определяются отклонения фазовых координат от точки цели  $\mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}^k$ , которые запоминаются. Очевидно, в общем случае они не будут равны 0 (за исключением одной координаты, по которой определяется время окончания процесса интегрирования).

Рассматриваемая процедура решения фактически устанавливает функциональную зависимость разности  $\mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}^k$  от вектора  $\psi^0$ . Обозначим эту функциональную зависимость  $\mathbf{Z}$ :

$$\mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}^k = \mathbf{Z}(\psi^0), \quad (11)$$

где  $\mathbf{Z}$  –  $n$ -мерная вектор-функция.

*Шаг 4.* Дается произвольное малое отклонение  $\Delta\psi^0$  выбранным на первом шаге  $\psi^0$ , и повторяются шаги 2 и 3.

*Шаг 5.* Определяется матрица функций влияния:

$$\mathbf{Z}'_{\psi}((\psi^0)^r) = \left( \frac{\partial z_i}{\partial \psi_j} \right)_{\psi^0 = (\psi^0)^r}, \quad (12)$$

где  $r$  – номер итерации,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ .

*Шаг 6.* Определяются последующие улучшенные приближения вектора  $\psi^0$  по итерационной формуле (метод Ньютона):

$$(\psi^0)^{r+1} = (\psi^0)^r - [\mathbf{Z}'_{\psi}((\psi^0)^r)]^{-1} \mathbf{Z}((\psi^0)^r), \quad (13)$$

где  $[\mathbf{Z}'_{\psi}]^{-1}$  – матрица, обратная матрице  $\mathbf{Z}'_{\psi}$ .

*Шаг 7.* Для полученных значений  $(\psi^0)^{r+1}$  повторяются шаги 2, 3, 5, 6.

В качестве условия окончания итераций естественно использовать условие

$$\|\mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}^k\| \leq \varepsilon_x,$$

где  $\|\cdot\|$  – некоторая векторная норма, например, евклидова;  $\varepsilon_x$  – требуемая точность выполнения условия  $\mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}^k = 0$ .

Таким образом, решение двухточечной краевой задачи сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений (11): найти вектор  $\psi^0$ , при котором  $\mathbf{Z}(\psi^0) = 0$ , или что то же самое, при котором  $\mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}^k$ .

Заметим, что функциональная зависимость (11) от  $\psi^0$  задана опосредствованно.

Для отыскания корней функций существует много

разнообразных методов. Однако для численного решения конкретных задач наиболее широко используется метод Ньютона, итерационная схема которого имеет вид (13), и его модификации. Если начальное приближение выбрано достаточно близко к значению искомого корня, то метод Ньютона сходится очень быстро и удобен для практического использования. В противном случае метод Ньютона может привести к расходящейся последовательности итераций.

Несмотря ни на какие модификации, применение метода Ньютона (или другого метода отыскания корней) невозможно без удовлетворительного первого приближения. Успех решения рассматриваемых задач определяется в первую очередь удачным первым приближением. Вопрос о первом приближении обычно бывает достаточно труден, поскольку надо подобрать начальные значения сопряжённых переменных, для которых нет (в общем случае) хорошей динамической интерпретации, т. е. практически отсутствуют содержательные соображения для выбора вектора  $(\psi^0)^0$ .

Таким образом, необходимость предварительного выбора первого приближения, которое гарантировало бы сходимость, – одна из основных трудностей рассмотренного подхода к решению поставленной задачи.

Несмотря на большое количество работ, посвящённых принципу максимума, кроме отдельных рекомендаций [2, 3], нет надёжных методов определения начальных условий для сопряжённой системы уравнений.

Указанную трудность можно преодолеть воспользовавшись идеями метода последовательных опорных решений [4].

**Методика определения начальных приближений.** В соответствии с идеей метода последовательных опорных решений в качестве опорной структуры для определения опорного решения (начального приближения сопряжённых переменных для нелинейной системы) используем модель синхронного генератора с диодным бесщёточным возбудителем, линеаризованную в точке установившегося режима при конечных значениях параметров нагрузки  $r_n$  и  $x_n$ , относительно переменных состояния  $e_q$  (э.д.с генератора) и  $e'_{dv}$  (э.д.с за переходным сопротивлением возбудителя). Структурная схема линейной модели представлена на рис. 1.

При этом система линейных дифференциальных уравнений, описывающих объект управления, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{k_{1B}}{T_d} x_2 - \frac{(1+k_{2n}-k_{1B}k_{qy})}{T_d} x_1; \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k_{qy}}{T_{B1}} x_1 - \frac{1}{T_{B1}} x_2 + \frac{k_z k_y}{T_{B1}} \Theta. \end{aligned} \tag{14}$$

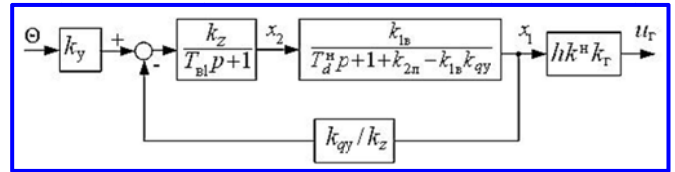


Рис. 1. Структурная схема синхронного генератора с диодным бесщёточным возбудителем

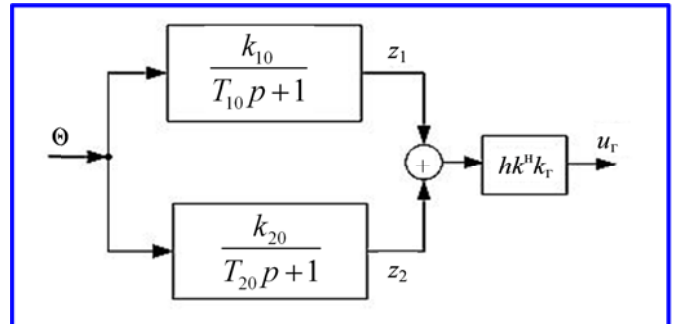


Рис. 2. Структурная схема синхронного генератора с диодным бесщёточным возбудителем, приведённая к параллельному соединению простых структур

Представим структурную схему объекта управления (см. рис. 1) в виде параллельного соединения простых структур – динамических звеньев первого порядка (рис. 2).

Переход к параллельному соединению простых структур возможен, если коэффициент демпфирования объекта управления

$$\xi = \frac{2B_0}{\sqrt{A_0}} > 1,$$

где  $A_0 = \frac{T_d^H T_{B1}}{1+k_{2n}}$ ;  $B_0 = \frac{T_{B1} + T_{B1}(k_{2n} - k_{qy}k_{1B}) + T_d^H}{1+k_{2n}}$ .

В частности для генератора типа СБГ-800, на модели которого проводилась проверка теоретических положений, в рабочем диапазоне изменения тока нагрузки от 0 до 1,5 о. е.  $\xi > 1$ .

В этом случае постоянные времени  $T_{10}$  и  $T_{20}$  и коэффициенты передачи  $k_{10}$  и  $k_{20}$  определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} T_{10} &= 2A_0 / (B_0 + \sqrt{B_0^2 - 4A_0}); \\ T_{20} &= 2A_0 / (B_0 - \sqrt{B_0^2 - 4A_0}); \\ k_{10} &= k_y k_{1B} k_z T_{10} / ((T_{10} - T_{20})(1+k_{2n})); \\ k_{20} &= k_y k_{1B} k_z T_{20} / ((T_{10} - T_{20})(1+k_{2n})). \end{aligned}$$

Связь между переменными состояния исходной системы и преобразованной системы определяется

матрицей преобразования (перехода векторов из нового базиса в старый)  $\Gamma$  размером  $2 \times 2$ , удовлетворяющая условию невырожденности, т. е.  $\text{def}\Gamma = 0$ .

Элементы матрицы перехода от переменных  $\mathbf{z} = [z_1, z_2]$  к  $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$  определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} t_{11} &= 1; \\ t_{21} &= \frac{(T_{10}(1+k_{2л}-k_{гв}k_{1В})+T_d^H)}{(k_{1В}T_{10})}; \\ t_{12} &= 1; \\ t_{22} &= \frac{(T_{20}(1+k_{2л}-k_{гв}k_{1В})+T_d^H)}{(k_{1В}T_{20})}. \end{aligned}$$

Решим задачу нахождения оптимального по быстрейшему управлению линейным объектом (14) по переводу из начального состояния  $\mathbf{z}(0) = (z_{10}, z_{20})$  в конечное  $\mathbf{z}(T_k) = (z_{1k}, z_{2k})$  за минимально возможное время методом длительностей интервалов управления.

Известно, что для этого нужно  $n = 2$  интервалов управления, где знаки должны чередоваться  $(n - 1)$  раз.

Обозначим длительность интервалов через  $t_1, t_2 > 0$ . Начало управления свяжем с  $t = 0$ . Используя метод приспособывания и учитывая смену знака управляющего воздействия, можно получить трансцендентную систему алгебраических уравнений относительно длительностей интервалов оптимального управления  $t_i$  ( $i = 1, 2$ ), решение которой позволит определить оптимальную программу по переводу объекта из начального положения  $\mathbf{z}^0$  в конечное  $\mathbf{z}^k$ .

Система алгебраических уравнений относительно длительностей интервалов оптимального управления  $t_1, t_2$  имеет вид:

– для режима наброса нагрузки ( $u_r < u_{r,ном}$ )

$$(z_{10} - k_{10}\Theta_{\max}) \exp(-(t_1 + t_2)/T_{10}) + k_{10}(\Theta_{\max} - \Theta_{\min}) \exp(-t_2/T_{10}) + k_{10}\Theta_{\min} = z_{1k}; \quad (15)$$

$$(z_{20} - k_{20}\Theta_{\max}) \exp(-(t_1 + t_2)/T_{20}) + k_{20}(\Theta_{\max} - \Theta_{\min}) \exp(-t_2/T_{20}) + k_{20}\Theta_{\min} = z_{2k}; \quad (16)$$

– для режима сброса нагрузки ( $u_r > u_{r,ном}$ )

$$(z_{10} - k_{10}\Theta_{\max}) \exp(-(t_1 + t_2)/T_{10}) + k_{10}(\Theta_{\max} + \Theta_{\min}) \exp(-t_2/T_{10}) + k_{10}\Theta_{\min} = z_{1k}; \quad (17)$$

$$(z_{20} - k_{20}\Theta_{\max}) \exp(-(t_1 + t_2)/T_{20}) + k_{20}(\Theta_{\max} + \Theta_{\min}) \exp(-t_2/T_{20}) + k_{20}\Theta_{\min} = z_{2k}. \quad (18)$$

В результате решения систем уравнений, которые можно получить в аналитическом виде, получим значения длительностей интервалов оптимального управления  $t_1, t_2$ .

Сопряжённая система уравнений для (14) имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_1 &= \frac{1+k_{2л}-k_{гв}k_{1В}}{T_d^H} \Psi_1 - \frac{k_{гв}}{T_{В1}} \Psi_2; \\ \dot{\Psi}_2 &= \frac{k_{1В}}{T_d^H} \Psi_1 - \frac{1}{T_{В1}} \Psi_2 \end{aligned} \quad (19)$$

или в матричной форме

$$\frac{d\Psi}{dt} = S\Psi, \quad (20)$$

$$\text{где } S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+k_{2л}-k_{гв}k_{1В}}{T_d^H} & -\frac{k_{гв}}{T_{В1}} \\ \frac{k_{1В}}{T_d^H} & -\frac{1}{T_{В1}} \end{bmatrix}.$$

Решение сопряжённой системы можно также получить в аналитическом виде

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= C_1 \exp(-\lambda_1 t) + C_2 \exp(-\lambda_2 t); \\ \Psi_2 &= -C_1 (s_{11} + \lambda_1) / s_{12} \exp(-\lambda_1 t) - \\ &\quad - C_2 (s_{11} + \lambda_2) / s_{12} \exp(-\lambda_2 t); \end{aligned} \quad (21)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования.

Используя значения длительностей интервалов  $t_1, t_2$ , несложно определить начальные значения сопряжённых переменных  $\Psi_i^0$ . Для этого необходимо учесть, что в момент переключения управления  $t_1$  кривая  $\Psi_2(t)$  проходит через нуль, т. е.  $\Psi_2(t_1) = 0$ , а постоянные интегрирования определяются с точностью до постоянного множителя. В этом случае, положив  $C_1 = 1$ , получим

$$C_2 = \frac{-(s_{11} + \lambda_1) / s_{12} \exp(-\lambda_1 t_1)}{(s_{11} + \lambda_2) / s_{12} \exp(-\lambda_2 t_2)}.$$

Получив значения  $C_1$  и  $C_2$ , несложно определить значения  $\Psi_i^0$  для линейной (линеаризованной) системы, которые далее используются в качестве начального приближения сопряжённых переменных при нахождении оптимального управления для

нелинейной системы (при реализации итерационной процедуры, описанной выше).

### Заключение

Расчёт оптимального управления для нелинейной системы (3) по описанному алгоритму показал хорошую сходимость итерационных процессов, что свидетельствует об удачном выборе начальных приближений сопряжённых переменных. Так при расчёте оптимального управления при набросе нагрузки итерационный процесс сходится уже за 2 – 3 итерации, а при расчёте оптимального управления при сбросе нагрузки итерационный процесс сходится за 4 – 5 итераций.

Предлагаемый подход расчёта оптимального по быстродействию управления позволит обеспечить за счёт быстрой сходимости итерационного процесса реализацию оптимального регулирования в масштабе реального времени, тем самым повышая качество переходных процессов в автономных си-

стемах электроснабжения на базе синхронного генератора с диодным бесщёточным возбудителем.

### Литература

1. Герасимов А. Н. Математические модели и сравнительный анализ бесщёточных систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов малой и средней мощности / А. Н. Герасимов, В. В. Карагодин // Деп. рукопись. – СПб. : ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1995. – инв. № 41914. – 60 с.
2. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1971. – 424 с.
3. Антомонов Ю. Г. Синтез оптимальных систем / Ю. Г. Антомонов. – Киев : Наук. Думка, 1972. – 320 с.
4. Вишняков Е. П. Применение метода последовательных опорных решений в задачах оптимального по быстродействию управления электроэнергетическими объектами / Е. П. Вишняков, А. Н. Герасимов, В. В. Карагодин // Старт в будущее: Тр. второй научн.-техн. конф. молодых специалистов 14 апреля 2011 г. – СПб. : ОАО «КБСМ», 2011. – С. 49 – 53.

Поступила в редакцию 04.06.2013

**Владимир Викторович Карагодин**, канд. техн. наук, профессор,  
e-mail: vladimirkar@rambler.ru, т. (812) 347-96-44.

**Евгений Павлович Вишняков**, канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: vishep82@gmail.com, т. (812) 347-96-44.

**Вадим Александрович Горин**, адъюнкт, e-mail: vadim044542010@mail.ru,  
т. (812) 347-96-44.