

Апышев Ж.А., Джолдошева Б.О., Таабалдиева Н.Д.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

УДК: 62-50

Рассматривается задача управления синхронным генератором, обеспечивающего стабилизацию напряжения на выходной шине генератора, скорости вращения и углового положения ротора при некотором начальном отклонении от желаемого значения.

В данной статье предлагается синтезировать регулятор для решения задачи стабилизации на примере синхронного генератора (объекта управления) на основе предложенного метода [1]. Для исследования динамических процессов в энергосистеме предложен один из вариантов записи уравнений в относительных единицах [2], которая обеспечивает их дальнейшее удобное моделирование на интерактивной среде MATLAB с применением современных инструментальных средств. Построенная математическая модель в отличие от модели [1] учитывает сложности в виде: а) демпфирующих факторов; б) активного сопротивления обмотки статора; в) трансформаторных э.д.с.; г) влияния насыщения магнитной цепи; д) влияния нагрузки на систему неограниченной мощности через линию электропередачи. Система неограниченной мощности, это источник с неизменной частотой и постоянным по модулю и фазе напряжением. По отношению к мощности одной машины, шины энергосистемы большой мощности могут рассматриваться приближенно как шины системы неограниченной мощности.

В работе [1] на основе полученных достаточных условий разработаны и реализованы до программного средства метод синтеза управляющих устройств для многомерного объекта, обеспечивающие такие требования к системе, как заданные показатели качества переходных процессов системы, устойчивость, возможная простота регулятора. Одновременно обеспечиваются выполнение определенных ограничений на управление, переменные состояния и выходные переменные. Отдельные этапы разработанных методов являются независимыми. Это допускает эффективное использование разработанных методов и алгоритмических процедур синтеза в различных системах автоматизированного проектирования, в частности, в нижеприведенной модели синхронной машины.

Рассмотрим систему неограниченной мощности с учетом вышеуказанных факторных сложностей. Система является устройством преобразования энергии, в котором энергия воды превращается в электрическую энергию [2]. Количество воды, поступающей в турбину, регулируется регулятором частоты вращения. Система возбуждения регулирует значение э.д.с. генератора, т.е. выходное напряжение, а также коэффициент мощности и амплитуду тока.

Система уравнений, применяемая для анализа динамической устойчивости и качества переходных процессов синхронной машины, обычно нелинейна. Она представляет собой большую систему взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений вида:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1)$$

где f – n -мерный вектор нелинейных функций; x – n -мерный вектор, характеризующий состояние системы; u – m -мерный вектор управляющих воздействий; t – время.

Если система подверглась воздействию какого-то возмущения, она придет в новое состояние. Если возмущение незначительно, новое установившееся состояние системы не будет заметно отличаться от исходного. Другими словами, изменения параметров системы в новом установившемся режиме будут не существенными, т.е. они не выйдут за пределы определенной окрестности исходного состояния x_0 . В ограниченном диапазоне изменения режима нелинейная энергосистема может быть математически описана системой линеаризованных уравнений. Это дает существенные преимущества, т.к. производить операции с линейными системами более просто и удобно.

При линеаризации дифференциальных уравнений, описывающих поведение энергосистемы, исходят из предположения, что изменения системных параметров δ_A, U_A, P_A (изменения угла, напряжения, мощности) малы. Уравнение для этих переменных определяется с помощью разложения в ряд Тейлора в точке x_0 , причем членами высокого порядка пренебрегают. Далее анализируется характер этих изменений. При этом анализе важно выяснить не только то, возрастают ли колебания, возникшие в результате малых возмущений, или нет, но и хорошо ли они в последнем случае *демпфируются*.

При исследованиях устойчивости энергосистем часто для удобства полагают, что возмущения, воздействующие на энергосистему, исчезают, т.е. анализируется свободное движение системы. В этом случае устойчивость обеспечивается, если система возвращается в свое первоначальное состояние. Если математическое описание энергосистемы сделано с помощью переменных состояния

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(t_0) = x_0, \quad (2)$$

то свободное движение системы может быть исследовано путем анализа собственных значений матрицы A , где A – матрица коэффициентов состояния размерности $n \times n$; B – матрица коэффициентов управления размерности $n \times m$; $x(t_0)$ – начальные условия по состоянию при $t=t_0$.

Линейную модель синхронной машины, использующей в качестве переменных состояния токи, уравнения движения и угла ротора можно записать в виде обыкновенных дифференциальных уравнений состояния в нормальной форме, которое имеет вид:

$$\begin{aligned}
 dx_1(t)/dt &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + a_{16}x_6 + a_{17}x_7 + a_{111}x_{11} \\
 dx_2(t)/dt &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 + a_{27}x_7 + a_{211}x_{11} \\
 dx_3(t)/dt &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 + a_{36}x_6 + a_{37}x_7 + a_{311}x_{11} \\
 dx_4(t)/dt &= a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + a_{45}x_5 + a_{46}x_6 + a_{47}x_7 \\
 dx_5(t)/dt &= a_{51}x_1 + a_{52}x_2 + a_{53}x_3 + a_{54}x_4 + a_{55}x_5 + a_{56}x_6 + a_{57}x_7 \\
 dx_6(t)/dt &= a_{61}x_1 + a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5 + b_{66}u_1 \\
 dx_7(t)/dt &= a_{76}x_6 \\
 dx_8(t)/dt &= a_{81}x_1 + a_{82}x_2 + a_{83}x_3 + a_{84}x_4 + a_{85}x_5 + a_{86}x_6 + a_{87}x_7 + a_{88}x_8 + a_{811}x_{11} \\
 dx_9(t)/dt &= a_{99}x_9 + a_{910}x_{10} + a_{911}x_{11} \\
 dx_{10}(t)/dt &= a_{108}x_8 + a_{109}x_9 + a_{1010}x_{10} + a_{1011}x_{11} + b_{1010}u_2 \\
 dx_{11}(t)/dt &= a_{1110}x_{10} + a_{1111}x_{11}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Начальные условия по состоянию:

$$x(0) = [-1.59, 2.2, 1.914, 0.7, 1.045, 0.127, -0.12, 1.1, 1, 3.5, -0.2],$$

а уравнение выходных переменных

$$\left. \begin{aligned}
 y_1 &= c_{12}x_{12} \\
 y_2 &= c_{26}x_6 \\
 y_3 &= c_{37}x_7
 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

Начальные условия по выходу (или по измеряемым переменным) будут иметь вид:

$$y(0) = [1.35 \quad 0.89 \quad 0.5]^T. \tag{5}$$

где $x = [i_d, i_f, i_D, i_q, i_Q, \omega, \delta, U_1, U_3, U_R, E_{fd}]^T$ – вектор переменных состояния, часть координат в нём которой, представляют токи по соответствующим обмоткам.

Выберем элементы матрицы измеряемых переменных в виде $c_{12} = c_{26} = c_{37} = 1$.

Введем следующие обозначения:

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega(t) \\ \Delta\delta(t) \\ \Delta E_{fd}(t) \end{bmatrix}, \quad u = u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_{fd}(t) \\ \Delta M_{mx}(t) \end{bmatrix},$$

где Δ – соответствующее отклонение от номинального (установившегося) значения, $\hat{y}_1(t) = E_{fd}$ – отклонение напряжение на шине генератора; $\hat{y}_2(t) = \alpha(t)$ – отклонение угловой скорости вращения, $\hat{y}_3(t) = \delta(t)$ – отклонение углового положения ротора генератора, $\hat{y} = \hat{y}(t) = [\hat{y}_1(t) \quad \hat{y}_2(t) \quad \hat{y}_3(t)]^T$ – вектор выходных или регулируемых переменных, $u_1(t) = \Delta E_{fd}(t)$, $u_2(t) = \Delta M_{mx}(t)$ – отклонения напряжения возбуждения и механического момента генератора, $u(t) = [u_1(t), u_2(t)]^T$ – вектор управляющих или регулирующих воздействий. δ (в радианах или градусах) – электрический угол, который определяется положением ротора (точнее, угол между векторами магнитодвижущей силы обмотки возбуждения и результирующей магнитодвижущей силы в воздушном зазоре, причем они вращаются с синхронной скоростью). Этот же угол имеет место между э.д.с. генератора и вектора напряжения статора, если в качестве переменных состояния используются токи, а не потокосцепления; ω [рад./сек] – угловая скорость (или частота) вращающегося магнитного поля, т.е. величина, непосредственно связанная с током и напряжениями в сети или потокосцеплениями; L – взаимные и собственные индуктивности между обмотками и осями ротора,

Элементы приведенных матриц зависят от параметров и элементов сети и объекта управления рабочего режима и напряжения на шинах системы неограниченной мощности.

При расчетах установившегося (номинального) режима (часто называемых расчетами потокораспределения) обычно известны параметры на шинах генератора, его активная мощность и

напряжение. При исследованиях сложных систем эти параметры определяются итеративными методами с помощью вычислительных машин.

Когда в какой-то точке системы на нее накладывается возмущение, возникает небаланс между генерируемой и потребляемой мощностями, в результате которого имеет место переходный процесс. После того, как переходный процесс заканчивается и система приходит в новое установившееся состояние, возникший небаланс мощности распределяется между агрегатами в энергосистеме в соответствии со статистическими характеристиками их автоматических регуляторов частоты вращения (в соответствии со статизмом системы регулирования частоты вращения). В ходе процесса доля небаланса, приходящаяся на каждый из агрегатов, определяется различными параметрами. Если эти параметры у различных групп агрегатов различаются существенно, то в процессе перехода от первоначального распределения небаланса между агрегатами к конечному распределению в установившемся режиме имеют место колебания мощности между этими группами агрегатов.

Параметры синхронного генератора серии СВ 1100-145-88 и линии электропередачи в относительных (базовых) единицах приведены ниже [2]:

$$L_d=1.7; L_{d,d}=L_d=1.64; L_q=0.15; L_{AD}=kM_f=kM_D=1.55; L_{AQ}=kM_Q=1.49; L_f=1.651; L_{df}=0.101; L_D=1.605; L_{d,D}=0.055; L_Q=1.526; L_{d,Q}=0.036; r=0.0011; r_f=0.00074; r_D=0.0131; r_Q=0.0054; L_{MD}=0.02838; L_{MQ}=0.02836; R_e=0.02; L_e=0.4; \tau_J=1786.94;$$

Тогда матрицы состояния, управления и выходных переменных из (2) имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} -0.3606 & 0.0044 & 0.1414 & -34.8720 & -25.4700 & -24.4460 & 17.5130 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1247 & -0.0495 & 0.7686 & 12.0600 & 8.8086 & 8.4546 & -0.0061 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2278 & 0.0436 & -0.9602 & 22.0240 & 16.0860 & 15.4400 & -11.0610 & 0 & 0 & 0 \\ 35.9000 & 26.4970 & 26.4970 & -0.3606 & 0.9007 & 17.7670 & 23.8740 & 0 & 0 & 0 \\ -35.0570 & 25.8750 & 25.8750 & 0.3522 & -1.2332 & -17.3500 & -23.314 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0001 & -0.0020 & -0.0020 & -0.0080 & -0.0044 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2539 & 0.5602 & 0.5536 & 1.3450 & 1.2415 & 2.1102 & -1.0865 & -2.6526 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0371 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -21.220 & 21.220 & -0.5305 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * 10^3$$

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0.01 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * 10^3$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Первоначально машина вращается с синхронной скоростью и выдает некоторую известную мощность в систему. Изменение одного из координат вектора управления u_f и M_{MX} приводит к переходу системы в новое установившееся состояние, и этот переход обычно сопровождается затухающими колебаниями.

Задача управления синхронным генератором заключается в определении вектора управляющих воздействий u_f и M_{MX} , обеспечивающих стабилизацию напряжения на выходной шине генератора, угловой скорости вращения и угла ротора генератора при некотором начальном отклонении от установившегося значения. Система подвергается внешнему возмущению малых изменений нагрузки генератора.

Вектор выходных переменных: $\hat{y} = \hat{y}(t) = [\hat{y}_1(t) \ \hat{y}_2(t) \ \hat{y}_3(t)]^T$, где $\hat{y}_1(t) = E_{fd}(t)$ – отклонение напряжение на шине генератора; $\hat{y}_2(t) = \alpha(t)$ – отклонение угловой скорости вращения, $\hat{y}_3(t) = \delta(t)$ – отклонение углового положения ротора генератора.

На выходные переменные наложены ограничения в виде:

$$|y_1(t)| \leq q_1 = q_1(t), \quad |y_2(t)| \leq q_2 = q_2(t), \quad |y_3(t)| \leq q_3 = q_3(t), \quad (6)$$

где $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$, считаются непрерывно-дифференцируемыми функциями времени, определяющими допустимые зоны управляемых переменных (переходных процессов). Т.о., для рассматриваемого объекта управления на координаты измеряемых переменных $y(t)$ наложены прямые ограничения. Ограничения постоянны, они заданы в относительных единицах:

$$|y_1(t)| \leq q_1 = 1,5; \quad |y_2(t)| \leq q_2 = 1; \quad |y_3(t)| \leq q_3 = 0,6; \quad (7)$$

В результате задача синтеза систем стабилизации синхронного генератора математическая модель которого задается уравнениями состояния и выхода (3) и (4) с соответствующими начальными условиями по выходу (5) состоит в определении закона управления (линейного регулятора с обратной связью по измеряемым переменным) $u = u(t)$, обеспечивающего гарантированное выполнение

ограничений на регулируемые координаты процессов определяемыми соотношениями в виде прямых ограничений (7).

Компьютерное моделирование замкнутой системы управления.

Вычисление матрицы регулятора [1]. Пусть отклонения от начального состояния $x(0)$ составляют 10 %.

В данном случае малым возмущением является отклонения переменных от начального состояния на 10%, тогда

$$\eta = -x^0 + Ax^0 + Bu^0 + f = [-60.8; 27.2; 36.9; 88; -86.3; 13.49; 0.01; 2.78; -0.03; -41.78; -0.238]^T$$

Результаты анализа и моделирования рассматриваемого объекта регулирования показывают, что объект не полностью управляем и не полностью наблюдаем, т.е. матрица управляемости объекта

$$\text{rank}[A, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B] = 9,$$

а матрица наблюдаемости $\text{rank}[C^T, A^T C^T, (A^T)^2 C^T, \dots, (A^T)^{n-1} C^T] = 8.$

Далее применяя метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР Лётова – Калмана) [3], были вычислены оптимальные параметры линейного регулятора по регулируемым или выходным переменным и проверка выполнения заданных прямых ограничений (7).

Матрица регулятора имеет вид:

$$K_Y = \begin{bmatrix} 2.2222 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Спектр или собственные значения λ_i , матрицы замкнутой системы $\{A + BK^0C\}$ имеют вид:

$$\lambda_i = [-0.5; -2.6; -0.36 + 9.9i; -0.36 - 9.9i; -4.9; -0.01 + 0.008i; -0.01 - 0.008i; -0.9; -1.2; -0.037; -0.5],$$

где $i = 1, \dots, n$; $n = 11$ – порядок рассматриваемой системы.

На рис.1 и рис. 10 приводятся структурные схемы для компьютерного моделирования с найденным линейным управлением с обратной связью по выходу соответственно для векторного и скалярного случая.

На рис.1– рис.5 показаны переходные процессы по измеряемым переменным (отклонения напряжения на шинах генератора, отклонения угловой скорости и угла ротора от установившихся значений). На рис.6 и рис. 7 показаны соответствующая фазовая траектория исходящих из заданных начальных условий для возмущенного объекта управления (синхронного генератора). Из этих рисунков сделаем вывод о том, что найденное линейное управление $u = u(t)$ по выходу с матрицей К обеспечивает выполнение прямых ограничений на выход объекта. Сравнивая переходные процессы с переходными процессами с [1], можно сделать вывод, что напряжения генератора, угловая скорость и угол ротора достигают своих новых установившихся значений. При наличии обмотки возбуждения (возбудителя) и демпфирующих обмоток (демпфера) установившийся режим достигается быстрее, процессы почти не имеют колебательный характер (с допустимым перерегулированием), они монотонны.

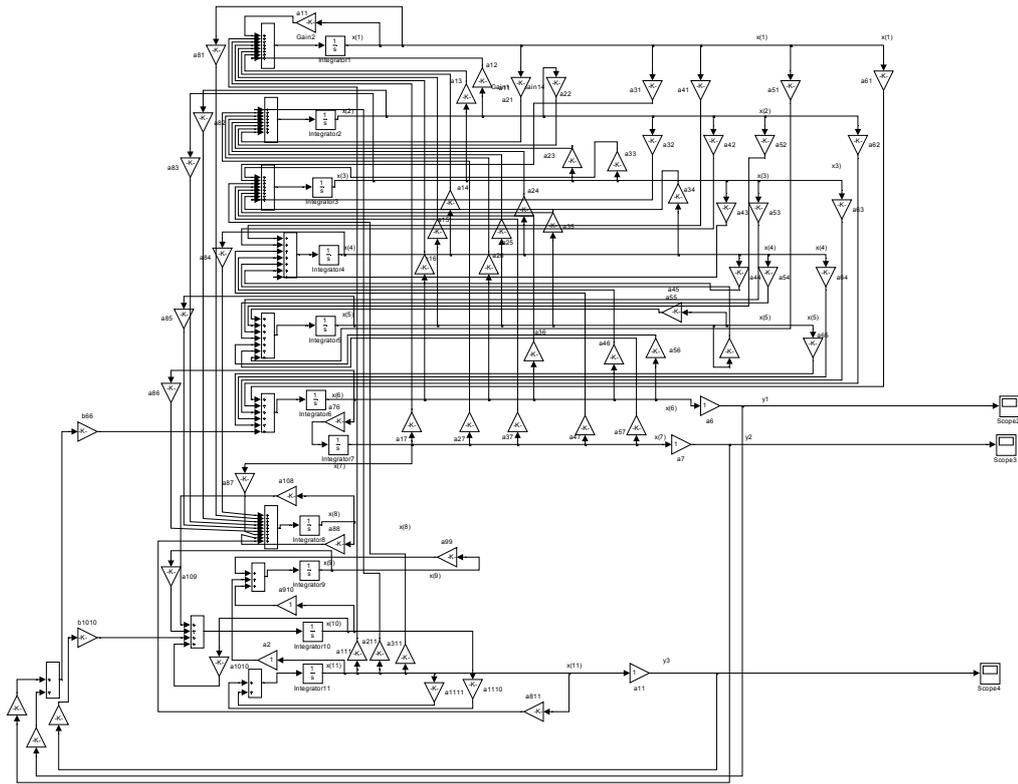
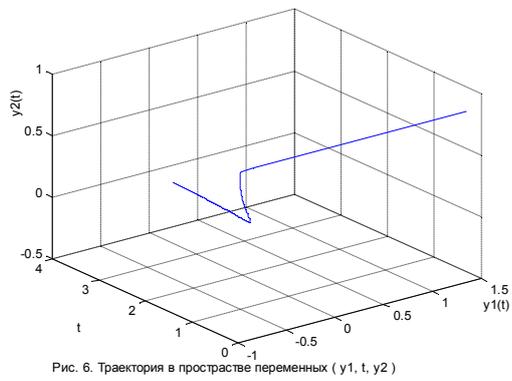
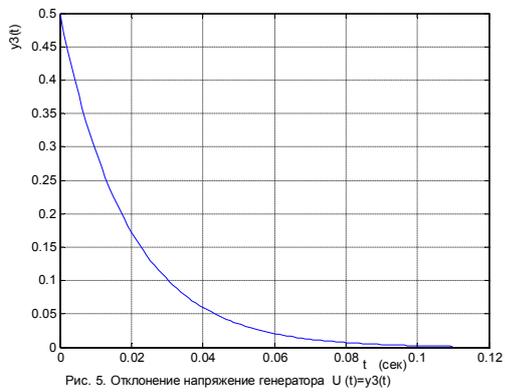
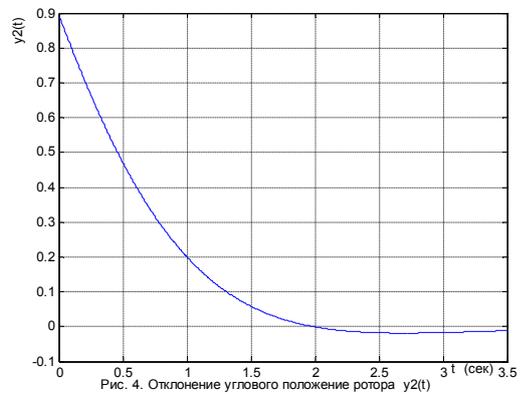
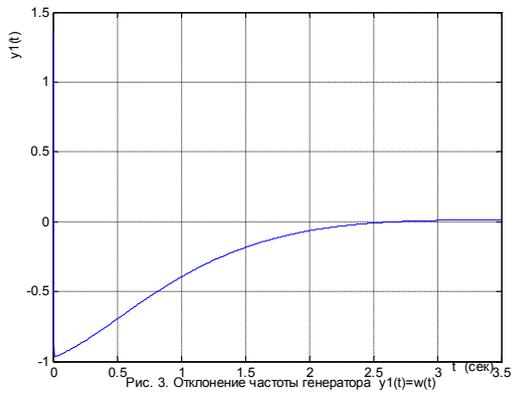


Рис. 1. Структурная схема моделирования на среде ППП Matlab/Simulink



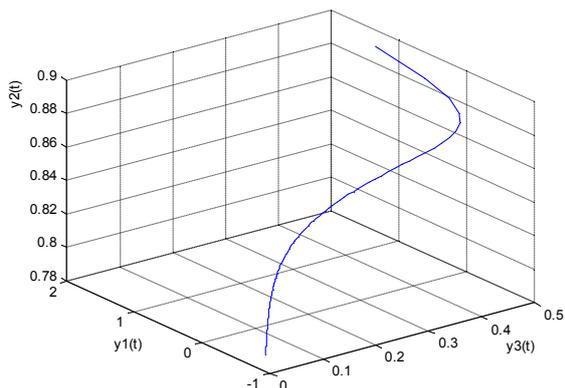


Рис. 7. Траектория в фазовом пространстве (y_3, y_1, y_2)

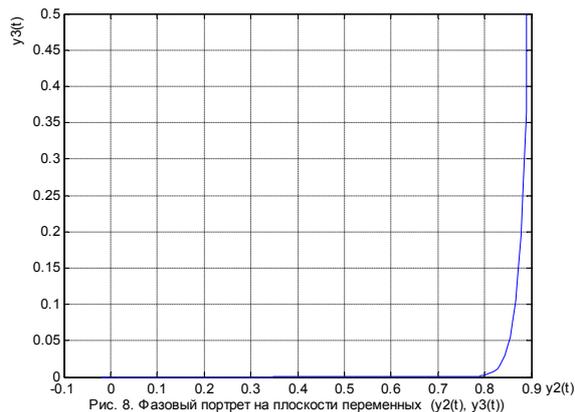


Рис. 8. Фазовый портрет на плоскости переменных ($y_2(t), y_3(t)$)

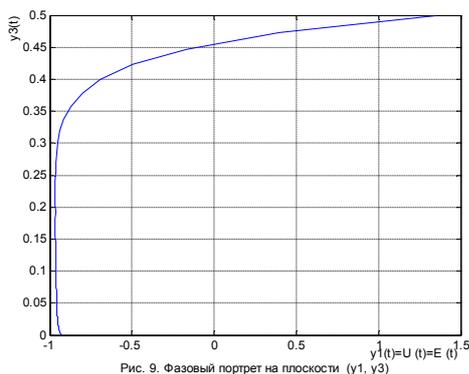


Рис. 9. Фазовый портрет на плоскости (y_1, y_3)

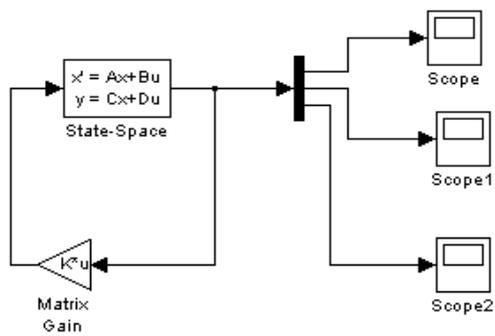


Рис. 10. Структурная схема моделирования системы

На основе предложенного метода [1] получены предельно простым способом безинерционные (статические, или состоящие из одних усилительных элементов) регуляторы для ряда (множества) начальных условий.

Литература:

1. Апышев Ж.А., Джолдошев Б.О. Синтез регулятора подсистемы стабилизации синхронного генератора и её моделирования // Известия КГТУ им. И. Раззакова, 2006. – С.
2. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980.
3. Справочник по теории автоматического управления /Под. Ред. А.А.Красовского. –М.: Наука. 1987. –712с.
4. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. – М.: Высшая школа,1990.
5. Справочник по электрическим машинам / Под. ред. И.П.Копылова Б.К.– Т.1. - М.,1988.
6. Шуйский В.П. Расчет электрических машин / Пер. с нем.–Л., 1968.
7. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. –М.: Высшая школа, 1985.