

УДК 621.313.333

**РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ
СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ****КАСУМОВА Т.К., ВЕЛИЕВА Т.Д.***Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия*

Автоматические регуляторы возбуждения сильного действия (АРВ СД) представляют собой сложные комплексы, предназначенные для обеспечения надежной и устойчивой работы синхронных машин в энергосистеме. Параметром, по которому осуществляется стабилизация движения ротора, является отклонение частоты вращения ротора. В статье предлагаются методика, алгоритм и программа синтеза оптимального АРВ (ОАРВ) синхронного двигателя при случайных возмущениях. Разработана интегрированная система для автоматизации проектирования оптимального регулятора возбуждения, состоящая из программных модулей: модели синхронной машины узла нагрузки, модели возмущений, анализа возможностей ОАРВ. Практическое использование указанных разработок показано на примере ОАРВ синхронного двигателя прокатного стана.

Синхронные двигатели (СД), благодаря своим конструктивным особенностям, нашли широкое применение в качестве привода самых разнообразных механизмов. В металлургической промышленности СД используются в электроприводах непрерывных прокатных станов, мощных компрессоров, воздуходувок. Во многих случаях, например, в прокатном производстве, СД работают с ударной нагрузкой.

При резких изменениях мощности на шинах питающей подстанции происходит отклонение показателей качества электрической энергии. Набросы нагрузки СД без автоматического регулирования возбуждения вызывают: во-первых, качания ротора; во-вторых, колебания реактивной мощности, которые обуславливают изменения напряжения по абсолютной величине; в-третьих, колебания активной мощности, которые являются причиной изменения частоты сети, появляются качания фазы. Колебания напряжения и качания фазы весьма отрицательно влияют на работу СД, узла нагрузки и смежных потребителей электроэнергии [1,2,3].

Существующие системы АРВ, реализованные в промышленных тиристорных устройствах, не обеспечивают удовлетворительного демпфирования качаний ротора и активного тока. Наиболее совершенной системой АРВ для синхронного электропривода с ударной нагрузкой, с точки зрения повышения динамической устойчивости и быстрого гашения качаний ротора двигателя, является выбор критерия и параметра оптимизации и разработка системы регулирования функции от параметра и его производных. В связи с этим, проблема разработки оптимальных законов регулирования возбуждения синхронных машин, а также оптимального регулирования напряжения в узлах нагрузки электроэнергетических систем (ЭЭС) с учетом вероятностного характера внешних возмущений является весьма актуальной.

В Азербайджанской Государственной нефтяной академии (АГНА) разработаны теория и метод синтеза оптимального АРВ (ОАРВ) синхронных машин, учитывающие как вероятностный характер тока узла нагрузки, так и дополнительные практические требования, важнейшими из которых являются следующие:

- при малых отклонениях любых параметров объектов управления или регулятора от расчетных значений должна сохраняться устойчивость;
- регулятор не должен содержать звеньев идеального дифференцирования, при реализации которых в систему проникают нежелательные помехи.

Реализация методов и алгоритмов построения систем автоматического управления различными техническими объектами, в том числе синхронными машинами, функционирующими в условиях непрерывного воздействия внешних возмущений стохастического характера, а также вопросы, связанные с автоматизацией проектирования таких систем, является важной задачей, имеющей большое научное значение.

Автоматизированное проектирование преследует две важные идеи: освобождение проектировщика от непроизводительного труда и решение многопараметрических и многовариантных задач, которые не под силу человеческому уму. Достижение второй цели предполагает повышение математического уровня задач проектирования на основе обобщения и формализации накопленного опыта.

Процесс проектирования ОАРВ синхронных машин для стабилизации напряжения узлов нагрузки энергосистем является многошаговым процессом с обратной связью и поэтому его можно принять как процесс управления по замкнутому циклу (рис.1).

Согласно [4-7], процедуру синтеза ОАРВ синхронной машины для стабилизации напряжения узла нагрузки математически можно сформулировать следующим образом.

Для синхронной машины, математической моделью которой является дифференциальное уравнение

$$A(D)U = B(D)U_b + C(D)I(t) \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} A(D) &= a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_0 \\ B(D) &= b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_0 \\ C(D) &= c_k D^k + c_{k-1} D^{k-1} + \dots + c_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$D = d/dt$; U - колебания напряжения на шинах узла нагрузки (обобщенная координата системы управления); U_b - отклонение напряжения возбуждения синхронной машины узла нагрузки (управляющее воздействие); $I(t)$ - колебание тока нагрузки узла нагрузки узла (возбуждающее воздействие); с учетом спектральной плотности мощности колебания тока нагрузки узла, определенной из эксперимента и аппроксимированной рациональной четной дробью вида:

$$S_I(\omega) = \frac{a_p (\omega^2)^p + a_{p-1} (\omega^2)^{p-1} + \dots + a_1 \omega^2 + a_0}{b_q (\omega^2)^q + b_{q-1} (\omega^2)^{q-1} + \dots + b_1 \omega^2 + b_0} = \frac{N(j\omega)N(-j\omega)}{T(j\omega)T(-j\omega)} \quad (3)$$

где $a_j (j=1, \dots, p)$ и $b_i (i=1, \dots, q)$ - постоянные коэффициенты; $N(j\omega)$, $T(j\omega)$ - соответственно гурвицевы и негурвицевы полиномы, требуется спроектировать оптимальный регулятор вида:

$$U_b = \frac{W_1(D)}{W_2(D)} U \quad (4)$$

где $W_1(D)$ и $W_2(D)$ - полиномы f -го и l -го порядка, которые минимизируют критерий оптимальности

$$I = \lambda^2 \langle U^2 \rangle + \langle U_b^2 \rangle \quad (5)$$

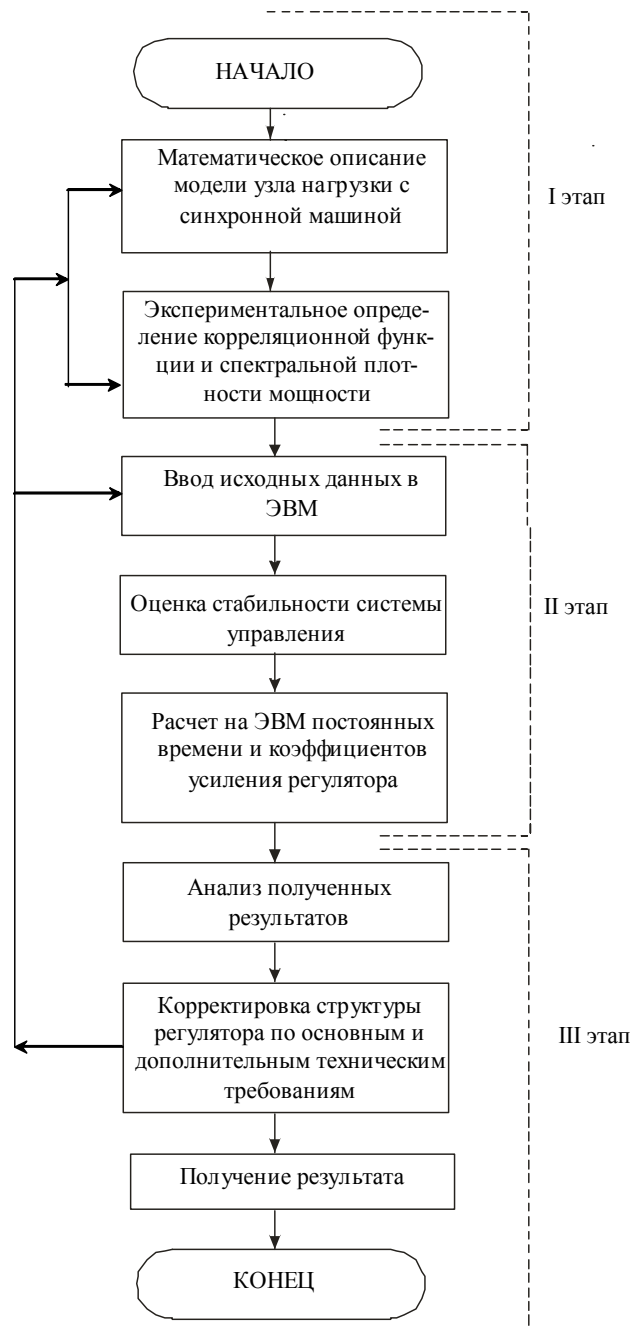


Рис.1. Структурная схема поэтапного проектирования ОАРВ синхронных машин

где λ^2 - множитель Лагранжа, $\langle U^2 \rangle$ - средний квадрат колебаний напряжения узла, $\langle U_b^2 \rangle$ - средний квадрат колебаний напряжения возбуждения, обеспечивающий устойчивость замкнутой системы.

Программное обеспечение автоматизированного проектирования ОАРВ синхронных машин удобно представить в виде пакета прикладных программ (ППП) [8,9]. Подобный ППП должен включать в себя программы, с помощью которых производится:

- составление удобной математической модели синхронных машин для оптимального стохастического синтеза ОАРВ синхронных машин;
- составление математической модели стохастических воздействий на базе результатов эксперимента;
- синтез оптимального стохастического АРВ синхронных машин с учетом предъявляемых основных и дополнительных практических требований к системе управления;
- оценка предельных возможностей оптимального стохастического АРВ синхронных машин;
- формирование оптимальных законов регулирования возбуждения синхронных машин.

Основой ППП являются математические алгоритмы построения ОАРВ, обеспечивающие требуемое качество и точность управления. Таких математических алгоритмов в технической литературе много. Но синтезированные по этим алгоритмам системы управления во многих случаях теряют устойчивость при малых вариациях параметров. В работе [4] приведены математические алгоритмы синтеза оптимальных линейных систем по среднеквадратичным критериям качества, которые учитывают целый ряд дополнительных требований, в том числе стабильность системы.

В программном обеспечении система автоматизированного проектирования (САПР) ОАРВ делится на две части: банк САПР и единая управляющая система. В банк данных автоматизированного синтеза оптимальных регуляторов возбуждения синхронных машин входят:

- математическая модель узла нагрузки;
- вероятностные характеристики возмущающих воздействий – корреляционные функции и спектральные плотности мощности изменения тока нагрузки узла нагрузки;
- статистические характеристики погрешностей измерительных приборов;
- библиотека программных модулей, совокупность которых обеспечивает решение задачи синтеза оптимального стохастического закона регулирования.

Библиотека программных модулей для проектирования оптимальных законов регулирования возбуждения синхронных машин имеет трехуровневую структуру. Схема структуры программных модулей показана на рис.2.

Модули первого, самого низкого уровня, являются вспомогательными программами, создание их облегчает формирование модулей второго и третьего уровней.

В модули второго уровня объединены три программы: *МД1* - модуль “*SINTE*” - программы получения стохастической математической модели объекта управления (синхронная машина узла нагрузки электроэнергетической системы); *МД2* - модуль “*DELNPD*” - программа записи закона регулирования в виде суммы динамических звеньев, удобной для последующей технической реализации; *МД3* - модуль “*COREL*” - программа определения и аппроксимации корреляционной функции и спектральной плотности мощности возмущающего воздействия (тока нагрузки узла нагрузки).

Модули третьего уровня представляют собой законченные программы, обеспечивающие синтез оптимального закона регулирования: *МДЛ1* – модуль “*REGUL1*” – основная программа синтеза оптимального регулятора (4) для системы (1) с учетом критерия оптимальности (5); *МДЛ2* – модуль “*REGUL2*” – программа факторизации спектральной мощности колебания тока нагрузки узла или спектральной плотности мощности погрешностей измерительных приборов; *МДЛ3* – модуль “*REGUL3*” – программа синтеза оптимального регулятора с учетом возможности отклонения действительных параметров от расчетных значений; *МДЛ4* – модуль “*REGUL4*” - программа синтеза оптимального регулятора при учете погрешностей измерительных приборов; *МДЛ5* – модуль “*REGUL5*” - программа синтеза оптимальных регуляторов при отсутствии ограничений на управление.

Модули всех уровней объединены в единый модуль “*REGUL*”, осуществляющий синтез оптимального стохастического закона регулирования синхронных машин.

На основе приведенной методики синтеза оптимального стохастического закона управления синтезирован ОАРВ для синхронного двигателя главного привода прокатного стана Азербайджанского трубопрокатного завода мощностью 5,2 МВт [10].

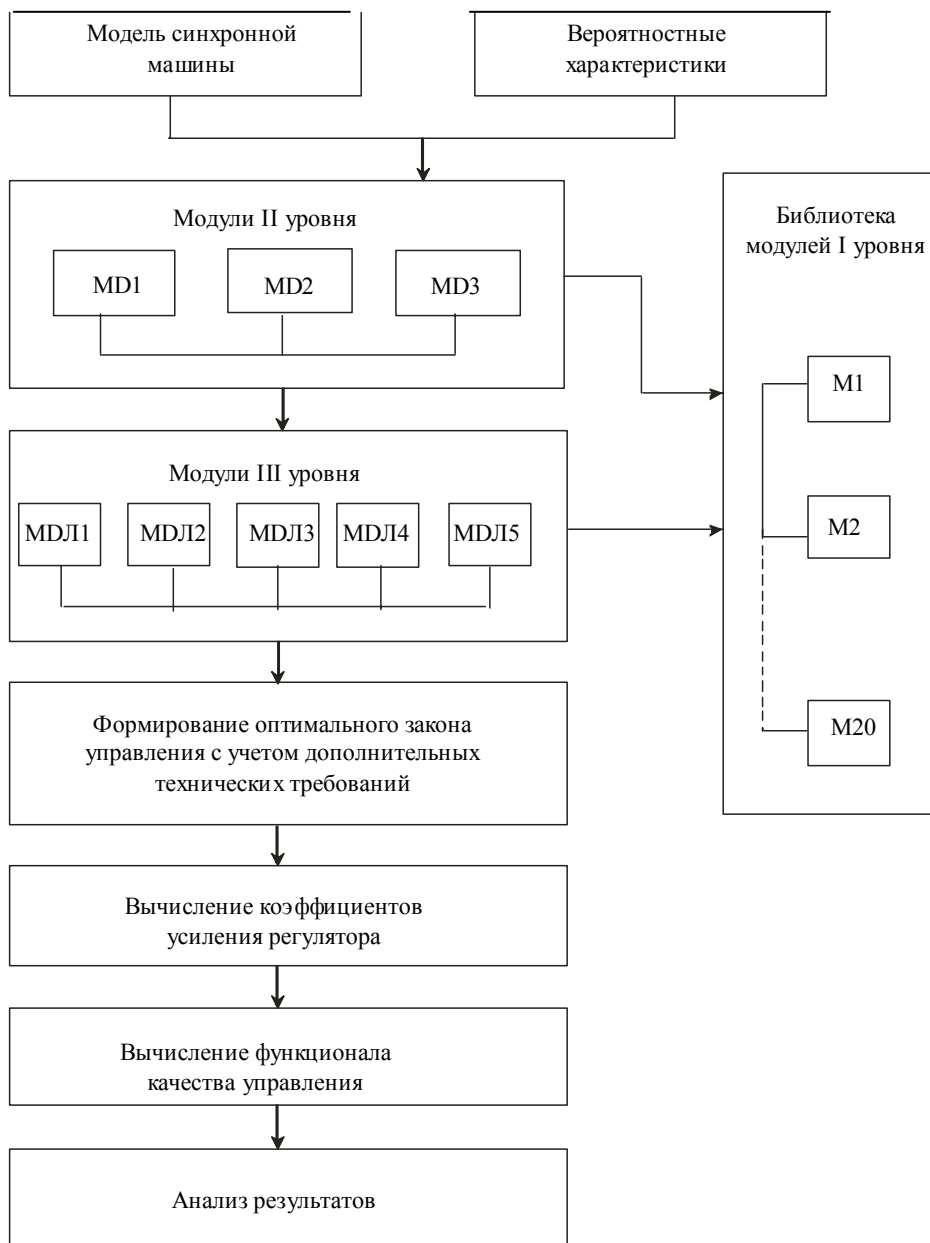


Рис.2. Структурная схема взаимосвязи программных модулей проектирования ОАРВ синхронных машин

Уравнение малых колебаний этого синхронного двигателя после соответствующих преобразований имеет вид (1), где $A(D)$, $B(D)$, $C(D)$ определяются по (9), а спектральная плотность мощности этого узла, приведенная к входу системы, имеет вид (10).

$$\begin{aligned} A(D) &= 0,02D^6 + 0,153D^5 + 0,36D^4 + 0,6D^3 + 0,22D^2 + 0,08D + 0,01 \\ B(D) &= 0,004D^6 + 0,23D^5 + 0,39D^4 + 0,49D^3 + 0,39D^2 + 0,1D + 0,05 \\ C(D) &= 0,44D^6 + 0,3D^5 - 1,3D^4 + 0,46D^3 - 0,0007D^2 - 0,1D + 0,06 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_I(\omega) &= \frac{4,85(\omega^2)^7 - 0,12(\omega^2)^6 - 6,5(\omega^2)^5 + 4,4(\omega^2)^4 +}{(\omega^2)^2 - 0,124\omega^2 + 0,01} \\ &+ \frac{2,4(\omega^2)^3 + 0,44(\omega^2)^2 + 0,12(\omega^2) + 0,03}{(\omega^2)^2 - 0,124\omega^2 + 0,01} \end{aligned} \quad (10)$$

Критерий качества принимается (5):

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (\lambda^2 U^2 + U_b^2) dt = \lambda^2 \langle U^2 \rangle + \langle U_b^2 \rangle$$

При использовании алгоритма и программы оптимального синтеза получен следующий оптимальный регулятор:

$$U_b = - \frac{122D^7 + 375D^6 + 534D^5 + 467D^4 + 265D^3 + 93D^2 + 11D + 3,47}{15,7D^7 + 7,5D^6 + 5,4D^5 + 3,7D^4 + 2,1D^3 + 1,5D^2 + 1,1D + 0,34} U \quad (11)$$

или в виде суммы динамических звеньев:

$$U_b = - \left[7,8 + \frac{13,4}{2,1D + 1} - \frac{4,1(3,5D - 1)}{2,5D^2 + 0,2D + 1} - \frac{2,7(8,4D + 1)}{4D^2 + 3,2D + 1} + \frac{3,5(17,3D + 1)}{2,3D^2 + 2,14D + 1} \right] U \quad (12)$$

Как видно, оптимальный регулятор может быть реализован в виде параллельного соединения простого усилительного, аperiodического и колебательного звеньев.

Для технической реализации полученного закона регулирования в синхронном двигателе используется система возбуждения типа ТЕВ-320/115 с АРВ пропорционального действия. Добавляя к функциональной схеме АРВ синхронного двигателя главного привода прокатного стана синтезированный оптимальный стохастический закон управления (12), получим функциональную схему системы регулирования, показанную на рис.3.

Расчетные и экспериментальные данные по испытанию оптимального закона регулирования напряжения узла нагрузки при наличии и отсутствии в синхронном двигателе ОАРВ приведены в таблице.

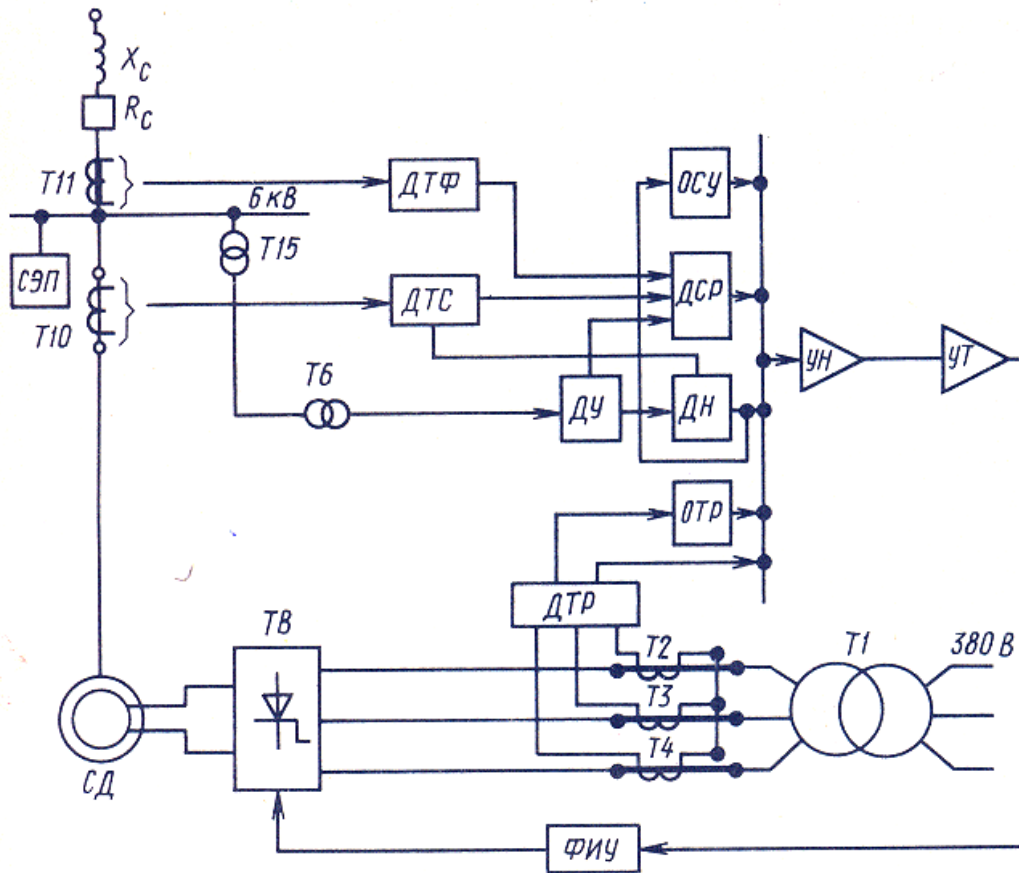


Рис.3. Функциональная схема оптимального АРВ синхронного двигателя главного привода прокатного стана

Таблица

Расчетные и экспериментальные данные оптимального закона регулирования возбуждения синхронного двигателя

Закон регулирования синхронного двигателя	Расчетные данные		Экспериментальные данные	
	σ_U	σ_{U_b}	σ_U	σ_{U_b}
с ОАРВ	0,0105	0,297	0,015	0,26
с АРВ	-	-	0,045	0,30
без АРВ	-	-	0,07	0,21

Как видно из таблицы, отклонения экспериментальных данных от расчетных составляют $\Delta\sigma_U=5\%$, $\Delta\sigma_{U_b}=6\%$, что вполне допустимо.

Для сравнительной количественной оценки эффективности ОАРВ по отношению к существующему АРВ синхронного двигателя при одной и той же спектральной плотности мощности тока нагрузки вычислены средние квадраты колебания напряжения узла нагрузки $\langle U^2 \rangle$ и отклонения напряжения возбуждения $\langle U_b^2 \rangle$ двигателя по формулам:

$$\langle U^2 \rangle = \int_0^{\infty} S_I(\omega) = \frac{|C(j\omega)|^2 d\omega}{|A(j\omega) - W(j\omega) \cdot B(j\omega)|^2} \quad (13)$$

$$\langle U_b^2 \rangle = \int_0^{\infty} S_I(\omega) = \frac{|C(j\omega)|^2 \cdot |W(j\omega)|^2 d\omega}{|A(j\omega) - W(j\omega) \cdot B(j\omega)|^2} \quad (14)$$

для различных коэффициентов усиления регуляторов $U_b = -(k_0 + k_1 D)U$ и (3.16) построены зависимости $\langle U^2 \rangle = f(\langle U_b^2 \rangle)$, которые приведены на рис.4.

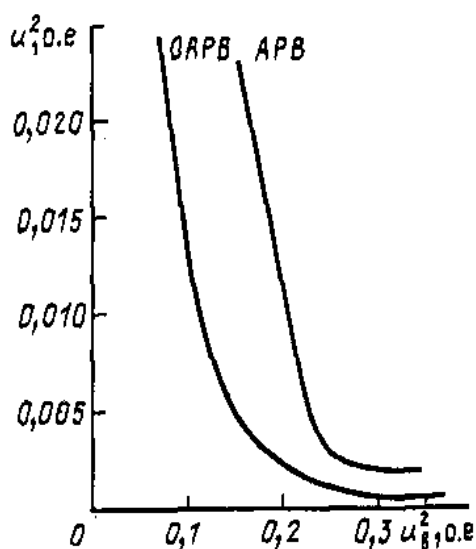


Рис.4. Кривые сравнения эффективности оптимального и обычного АРВ синхронной машины

Как видно из рисунка, если ОАРВ синхронного двигателя при $\langle U_b^2 \rangle = 0,24$ обеспечивает дисперсию колебания напряжения узла нагрузки $\langle U^2 \rangle = 0,00078$, то существующий АРВ сильного действия при такой же мощности управления обеспечит $\langle U^2 \rangle = 0,0025$, то есть ОАРВ эффективнее существующего АРВ при $\langle U_b^2 \rangle = 0,24$ в 3,2 раза.

В результате обобщенного анализа сформулированы общие требования, предъявляемые к автоматизации расчетного проектирования оптимальных стохастических АРВ синхронных машин. Проведен анализ выбранной структуры построения САПР ОАРВ

синхронных машин, который позволяет осуществить поэтапное проектирование оптимальных стохастических АРВ для синхронных машин узлов нагрузки и получить оптимальный вариант ОАРВ, удовлетворяющий всем заданным техническим и технологическим требованиям.

1. Корнилов Г.П., Храминин Т.Р. и др. Система векторного регулирования возбуждения синхронного двигателя. // Изв. вузов. Электромеханика. -2004. -№2. -с.28-30.
2. Фомин Д.В. Исследование системы автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя в функции угла нагрузки. // Изв. вузов. Электромеханика. -2004. -№2. -с.79-81.
3. Агамалов О.Н. Нечеткий адаптивный стабилизатор мощности синхронного генератора. // Электричество. -2004. -№9. -с.24-33.
4. Абдуллаев Н.Д., Петров Ю.П. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. - Л.: Энергоатомиздат, 1985, 240 с.
5. Касумова Т.К., Велиева Т.Д. Об использовании стохастического управления возбуждением синхронных машин при стабилизации динамических колебаний в энергосистеме. // Материалы респ. научно-техн. конф. «Научно-технические проблемы электроэнергетики в современных условиях». Баку.: АзНИЭ, 1997, С.186-188.
6. Kasumova T.K., Veliyeva T.D. Prospects of application optimal stochastic excitation regulator of synchronous machines in energy systems. // Second International Symposium of Mathematical & Computational Applications. - Baku, Azerbaijan, Qafkaz, University, Sept. 1-3, 1999, с.102-103
7. Касумова Т.К., Велиева Т.Д. Стабилизация динамических колебаний синхронных машин с использованием стохастического управления возбуждением. // Респ. научно-практическая конф., посвященная 80-летию АГНА «Рациональное использование энергоресурсов и надежность электрооборудования». Баку.: АГНА, 2000, с.261-264.
8. Велиева Т.Д. Некоторые аспекты автоматизации проектирования оптимальных АРВ синхронных машин. // Респ. научная конф., посвященная 800-летию юбилею Н.Туси. Баку.: Международный университет, 2001, с.583-586.
9. Велиева Т.Д. О структуре автоматизированного расчетного проектирования оптимальных АРВ синхронных машин. // Известия ВТУЗов Азербайджана. -2004. - №4. -с.61-64.
10. Kasumova T.K., Veliyeva T.D. Synthesis of optimum stochastic excitation control law of the rolling synchronous engine. // Second International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, TPE - 2004. -Tabriz, Iran, 6-8 Sept., 2004, p.141-142.

SINXRON MÜHƏRRİKİN OPTİMAL AVTOMATİK TƏSİRLƏNMƏNİN TƏNZİMLƏNMƏSİ SİSTEMİNİN İŞLƏNMƏSİ VƏ LAYİHƏLƏNDİRİLMƏSİ

QASIMOVA T.Q., VƏLİYEVƏ T.D.

Güclü təsirli avtomatik təsirlənmə tənzimləyiciləri (GT ATT) enerji sistemində sinxron maşınların etibarlı və dayanıqlı işini təmin etmək üçün mürəkkəb kompleksdən ibarətdir. Rotorun hərəkətini stabilləşdirmək üçün istifadə edilən parametr rotorun fırlanma tezliyinin yayınmalarıdır. Məqalədə təsadüfi təsirlərdə sinxron mühərrikin optimal ATT (OATT) üçün sintez üsulu, algoritmi və program təqdim olunur. Optimal təsirlənmə tənzimləyicisinin layihələndirilməsinin avtomatlaşdırılması üçün program modellərindən ibarət birləşdirilmiş sistem işlənmişdir: yük qovşğunun sinxron maşının modeli, təsirlərin modeli, OATT-nin imkanlarının təhlili. Göstərilən işləmələrin əməli tətbiqi yayma dəzgahının sinxron mühərrikinin OATT-si misalında göstərilmişdir.

**DEVELOPMENT AND DESIGNING OF SYSTEM OF OPTIMUM
STOXASTIC AUTOMATIC CONTROL OF EXCITATION
OF THE SYNCHRONOUS ENGINE**

KASUMOVA T.K., VELIYEVA T.D.

Automatic regulators of excitation (ARE) of strong action represent the difficult complexes intended for maintenance of reliable and steady job of synchronous machines in a power supply system. In parameter on which stabilization of movement of a rotor is carried out, the deviation of frequency of rotation of a rotor is. In the article the technique, algorithm and the program of synthesis optimum ARE (OARE) the synchronous engine are offered at casual indications. The integrated system for automation of designing of an optimum regulator of the excitation, consisting of program modules is developed: models of synchronous machine of the site of loading, model of indignations, the analysis of opportunities OARE. Practical use of the specified development is shown on example OARE of the synchronous engine of the rolling mill.