УДК 62-55:681.515

Д.Н. Демьянович, О.С. Вадутов, А.И. Солдатов

Исследование СВЧ-тракта синтезатора и разработка его модели при проектировании системы АРУ

Представлен подход к построению модели СВЧ-тракта синтезатора частоты для фиксированной частоты как объекта управления с целью дальнейшей разработки системы АРУ. Исследованы статические и динамические характеристики управляемого аттенюатора и цепи обратной связи. При построении модели применена аппроксимация нелинейной статической характеристики управляемого аттенюатора для трех частот: 5, 6 и 7 ГГц. Для динамической характеристики объекта управления определены порядок и коэффициенты уравнений, описывающие зависимость выходной мощности от входной мощности и управляющего воздействия, подаваемого на аттенюатор, а также зависимость выходного напряжения детектора от выходной мощности. Приведены результаты сравнительного анализа модели и реального объекта. Показана адекватность модели реальному объекту.

Ключевые слова: управляемый аттенюатор, аппроксимация нелинейной зависимости, нелинейный объект управления, статическая характеристика, динамические свойства, параметрическая обратная связь, разработка модели.

С развитием СВЧ-техники в окружающем нас мире количество всевозможных СВЧ-устройств возросло многократно. Передатчики и приемники СВЧ-диапазона используются в телекоммуникации, навигации, радиолокации. Для стабилизации выходной мощности передатчиков используется система автоматической регулировки усиления (АРУ). Такая система применяется и в лабораторных СВЧ-синтезаторах, используемых в качестве источников стабильных гармонических колебаний высокой частоты для настройки СВЧ-узлов. В системах АРУ лабораторных СВЧ-синтезаторов требуется минимизировать длительность переходного процесса при смене уровня сигнала или частоты для реализации требуемого быстродействия, гарантировать отсутствие перерегулирования для безопасной работы с усилительными устройствами и устранить или минимизировать статическую ошибку, обусловленную внешними возмущениями и изменением параметров СВЧ-устройства.

Для того чтобы обеспечить выполнение указанных требований при выборе параметров регулятора системы APУ, необходимо иметь подробную модель объекта управления и элементов системы, используемых для получения информации о состоянии объекта. Однако в большинстве работ, посвященных проектированию систем APУ или передатчиков, имеющих такую систему, вопросам составления и обоснования математических моделей уделяется мало внимания. Например, в работах [1, 2] произведен расчёт элементов цепи управления, но вообще отсутствуют сведения о статических и динамических свойствах аттенюатора как объекта управления. В работе [3] рассматривается система управления с линеаризацией статической характеристики управляемого аттенюатора путем введения звена, обладающего инверсной статической характеристикой.

В [4] исследуется система автоматического регулирования мощности передатчика, состоящая из радиоканала связи и канала радиоуправления, а работа [5] посвящена исследованию системы автоматического ПИД-регулирования мощности передатчика в адаптивных каналах радиосвязи при случайных замираниях. В этих работах приводится кусочно-линейная статическая характеристика управляемого аттенюатора, а в динамике последний представлен в виде линейной модели. Модель аттенюатора, отражающая его статические и динамические свойства, приведена в работе [6], однако процедура определения структуры и параметров динамической модели аттенюатора не описана.

Данная статья посвящена созданию математической модели СВЧ-тракта синтезатора в виде множества линейных моделей, определяющих его работу на отдельных участках нелинейной статической характеристики. Математические модели такого вида нашли применение при создании робастных и адаптивных систем управления и систем управления с нечеткими регуляторами различного назначения. Например, в литературе описаны и использованы модель ветрогенератора [7], антиблокировочной системы торможения автомобиля [8], химических реакторов [9, 10], парового котла [11].

Постановка задачи. Рассмотрим типовую схему соединения элементов тракта СВЧ-синтезатора. Она содержит нелинейный элемент, обеспечивающий умножение гармонического сигнала, усилители, один или несколько аттенюаторов, управляемых напряжением, наборы фильтров и ключей (рис. 1). Необходимо отметить, что схема соединения внутренних элементов СВЧ-тракта может значительно изменяться в зависимости от частоты выходного сигнала. Следовательно, если рассматривать СВЧ-синтезатор как объект управления, то его параметры и структура могут зависеть от частоты [12]. Уровень входной и выходной мощности измеряется в децибелах относительно опорного уровня мощности, равного 1 мВт (определяемого на номинальной нагрузке 50 Ом) – дБм, (децибелы по мощности). В статье $P_{\text{вьх}}(t)$ и $P_{\text{вых}}(t)$ отражают изменение уровня мощности СВЧ-сигналов в дБм от времени, а $E_p(t)$ – изменение напряжения управления от времени.



Так как после умножения частоты амплитуда сигнала может значительно меняться, то для поддержания заданного уровня на выходе синтезатора используется система АРУ (рис. 2), изменяющая коэффициент передачи управляемого аттенюатора [13, 14]. Цепь обратной связи состоит из направленного ответвителя, детектора огибающей высокочастотного сигнала, усилителя детектированного

сигнала, который сравнивается с опорным сигналом $P_{\text{BX}}(t)$ U_{o} , и регулятора, формирующего управляющий — сигнал.

Задача данной работы – создание модели СВЧ-тракта синтезатора для проектирования системы АРУ. В самом общем виде модель управляемого аттенюатора и измерительных элементов может быть описана уравнениями:

$$R_1[P_{\text{BbIX}}(t)] = R_2[P_{\text{BX}}(t), E_p(t)],$$
$$R_3[U_{\text{дет}}(t)] = R_4[P_{\text{BbIX}}(t)],$$



где $R_1[]...R_4[]$ – некоторые операторы.

Эти уравнения определяют статические и динамические свойства управляемого аттенюатора. Для идентификации операторов $R_1[]...R_4[]$ необходимо на основании данных, полученных экспериментально, определить статическую характеристику и выбрать границы интервалов, в которых управляемый аттенюатор может быть описан линейными динамическими моделями с фиксированными значениями параметров. Структура и параметры линейных динамических моделей управляемого аттенюатора и детектора на выбранных интервалах статической характеристики определяются из анализа реакции на входное воздействие в виде прямоугольного импульса.

Определение статической характеристики. Статические свойства управляемого аттенюатора определены зависимостью $P_{\text{Bыx}} = f(P_{\text{Bx}}, E_{\text{p}})$. Управляемый аттенюатор является аналогом усилителя, т.е. изменяет амплитуду входного сигнала, но имеет коэффициент передачи не больше единицы. Управляемым он называется потому, что его коэффициент передачи зависит от напряжения регулирования E_{p} .

Приведенная выше зависимость является уравнением поверхности. Нас интересует статическая характеристика по управлению. Для получения её аналитического выражения можно рассматривать эквивалентную схему p-*i*-*n*-диодного аттенюатора [15, 16], что приводит к усложнению модели и увеличению времени разработки. Более применимый на практике способ заключается в рассмотрении сечения поверхности в некоторой точке $P_{\rm BX} = {\rm const}$. Тогда статическая характеристика по управлению будет представлена в виде кривой и может быть определена экспериментально [6]. Для этого необходимо установить уровень входной мощности $P_{\rm BX}$ постоянным и изменять напряжение регулирования $E_{\rm p}$, фиксируя $P_{\rm вых}$.



7 ГГц (сплошная линия)

На рис. 3 представлены статические характеристики аттенюатора для трех частот (5, 6 и 7 ГГц), полученные указанным способом, при $P_{\rm BX} = 15,62$ дБм. Аппроксимируем нелинейную характеристику аттенюатора прямыми участками для интересующей нас рабочей области. Теперь статическая характеристика для выбранного участка определена коэффициентом передачи k₁. Выбор количества участков зависит от требуемой точности модели и формы кривой. Границы разбиения характеристик и коэффициенты передачи прямых участков для указанных выше частот свелены в табл. 1.

Таблица 1

Участок, №	$F = 5 \Gamma \Gamma$ ц		$F = 6 \Gamma \Gamma \mu$		$F = 7 \Gamma \Gamma$ ц	
	k_1	$E_{\rm p},{ m B}$	k_1	$E_{\rm p},{ m B}$	k_1	$E_{\rm p},{ m B}$
1	14,3	1,4661,896	23,22	1,2321,583	27,25	1,3491,544
2	58,26	1,8962,111	56,32	1,5832,013	57,42	1,5441,916
3	28,64	2,1112,384	21,6	2,0132,280	29,25	1,9162,130
4	14,3	2,3842,833	9,26	2,2802,560	15,52	2,1302,325
5	4,44	2,8333,419	2,56	2,5603,068	5,05	2,3252,815

Статические параметры аттенюатора для разных частот

Статические свойства цепи обратной связи определены зависимостью выходного напряжения детектора от выходной мощности синтезатора $U_{\text{дет}} = f(P_{\text{вых}})$. Для математического описания зависимости выходного напряжения цепи обратной связи от выходной мощности используем кусочнолинейную аппроксимацию. Зависимость напряжения детектора в цепи обратной связи от выходной мощности для выбранного участка выражается в виде коэффициента передачи k_2 . Полученные характеристики для разных частот практически совпадали, поэтому были использованы одинаковые области для аппроксимации. Полученные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статические параметры детектора для разных частот							
Vuontan Ma		k_2					
y qactor, nº	г _{вых} , д р м	$F = 5 \ \Gamma \Gamma$ ц	$F = 6 \Gamma \Gamma$ ц	F = 7 ГГц			
1	-2010	3,49e-4	3,97e-4	4,53e–4			
2	-103	2,2e-3	2,5e-3	2,9e-3			
3	-31	7,5e–3	8,2e-3	9,3e-3			
4	15	0,0188	0,203	0,0222			
5	515	0,0474	0,0508	0,0535			

атиналина параматры натантара пла разных налта

Определение параметров динамической модели. Представим линейную динамическую модель управляемого аттенюатора и измерительных элементов в виде операторно-структурной схемы, показанной на рис. 4. Входными сигналами являются мощность $P_{\rm BX}$, дБм, подаваемая на аттенюатор, и напряжение управления $E_{\rm p}$, задающее рабочую точку в середине линейного участка, границы которого выбираются по табл. 1. Выходным сигналом является напряжение детектора $U_{\rm дет}$. Для описания динамических свойств аттенюатора относительно изменения управляющего напряжения служит звено с передаточной функцией $W_E(s)$. Для описания динамических свойств аттенюатора относительно изменения входной мощности служит звено с передаточной функцией $W_P(s)$. Свойства цепи «направленный ответвитель–детектор–усилитель» представлены в виде звена с передаточной функцией $W_{\rm d}(s)$. $P_{\rm BX} \longrightarrow W_{\rm p}(s) \longrightarrow W_{\rm n}(s) \longrightarrow U_{\rm det}$

Для математического описания динамических свойств объекта необходимо исследовать его реакцию на один из тестовых сигналов. В качестве тестового сигнала здесь и в дальнейшем будем использовать прямоугольный импульс, так как поведение объекта при положительном и отрицательном изменении тестового сигнала может оказаться разным.

В отсутствие широкополосного измерителя мощности исследовать динамические свойства управляемого аттенюатора и определить $W_P(s)$ и $W_E(s)$ можно косвенным путем. Сначала необходимо отдельно исследовать инерционность цепи обратной связи и определить $W_{\rm d}(s)$. Для этого подаем прямоугольный импульс входной мощности на направленный ответвитель, исключив из цепи управляемый аттенюатор. На рис. 5 представлена осциллограмма при $P_{\rm BX} = 4,85$ дБм и прямоугольном импульсе амплитудой 4,8 дБм. Как видно из рис. 5, динамические свойства цепи обратной связи могут быть выражены в виде апериодического звена первого порядка [18] с передаточной функцией

$$W_{\rm d}(s) = \frac{k_2}{T_1 s + 1},$$

где T_1 – постоянная времени.

Для исследования динамических свойств по цепи управления используем изменение напряжения $E_{\rm p}$ в виде прямоугольного импульса и измеряем детектированный усиленный сигнал цепи обратной связи.

Относительная реакция на прямоугольный импульс напряжения управления амплитудой 0,076 В в рабочих точках 1,983 (*1*); 2,167 (*2*) и 2,441 (*3*) В показана на рис. 6, *а*.

Анализ полученных осциллограмм позволяет выбрать подходящие типы динамических звеньев и их постоянные времени. Динамические свойства управляемого атте-



 $W_E(s)$

Рис. 4. Операторно-структурная схема

объекта управления и измерительных

элементов

Рис. 5. Относительная реакция детектированного напряжения на прямоугольный импульс входной мощности, полученная при исследовании динамических свойств детектора

нюатора вместе с цепью «направленный ответвитель–детектор–усилитель» относительно изменения управляющего воздействия можно представить в виде звена, описываемого передаточной функцией



Рис. 6. Осциллограммы напряжения на выходе детектора: *a* – относительная реакция на прямоугольный импульс напряжения управления в разных рабочих точках; *б* – относительная реакция на прямоугольный импульс входной мощности разной амплитуды в одной рабочей точке

Следовательно, динамические свойства управляемого аттенюатора относительно изменения управляющего напряжения можно выразить в виде инерционно-форсирующего звена, описываемого передаточной функцией

$$W_E(s) = \frac{k_1(T_2s+1)}{T_3s+1}$$
.

Для исследования динамических свойств по цепи входной мощности поступаем аналогичным образом. На рис. 6, б изображена относительная реакция на прямоугольный импульс входной мощности, с уровня –3,17 до –0,4 дБм (4) и с –3,17 до 4,85 дБм (5) в рабочей точке 2,28 В.

Наличие отрицательного выброса в начале переходного процесса свидетельствует о том, что передаточная функция управляемого аттенюатора по цепи входной мощности содержит нуль, расположенный в правой полуплоскости, и имеет вид

$$W_P(s) = \frac{(T_4s+1)(-T_5s+1)}{(T_6s+1)(T_7s+1)}$$

Следовательно, по цепи входной мощности управляемый аттенюатор относится к неминимально-фазовым звеньям.

Таблица 3 Параметры динамической модели для разных частот

$F, \Gamma \Gamma$ ц	5	6	7				
T_1 , мкс	2,8	2	2				
T_{2} , мкс	5,6	5,38	4,33				
T_3 , мкс	14	14	13				
T_4 , мкс	6,84	4,6	7,11				
T_5 , мкс	0,87	2,6	2,11				
T_6 , мкс	3	2	5				
T_7 MKC	8	8	8				

Параметры динамической модели, полученные в результате исследования на разных рабочих точках для трех частот, сведены в табл. 3.

Проверка линейной модели управляемого аттенюатора. Адекватность полученной модели была оценена с помощью пакета Simulink (MATLAB). На рис. 7, *а* показана реакция объекта управления на прямоугольный импульс управляющего напряжения амплитудой 0,076 В в рабочей точке $E_p = 2$ В (сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – полученные на модели). На рис. 7, *б* представлены результаты для рабочей точки $E_p = 2,21$ В, а на рис. 7, $e - E_p = 2,5$ В.



Рис. 7. Реакция исследуемого аттенюатора на прямоугольный импульс напряжения управления (сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – полученные на модели): *а* – рабочая точка 2 В; *б* – рабочая точка 2,21 В; *в* – рабочая точка 2,5 В





На рис. 8 показана реакция объекта управления на прямоугольный импульс входной мощности с 2,39 дБм до 10 дБм в рабочей точке $E_p = 2,67$ В (сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – полученные на модели).

Как видно из рисунков, теоретические и экспериментальные результаты практически совпадают (среднеквадратичное отклонение не превышает 0,05 В), что говорит о корректности выбранной структуры и параметров математической модели управляемого аттенюатора и измерительной цепи.

Заключение. Один из возможных вариантов построения робастных систем управления для нелинейных объектов основан на использовании математической модели объекта в виде совокупности линейных моделей, характеризующих динамические свойства объекта в характерных рабочих точках. В статье получен набор линейных моделей управляемого аттенюатора и элементов измерения для выбранного ряда частот и заданной области напряжения управления. В отличие от работ [4–6] в полученной модели исследованы и учтены динамические свойства по цепи входной мощности.

В результате проведенного исследования установлено, что по цепи входной мощности управляемый аттенюатор относится к классу неминимально-фазовых звеньев.

Описанную в статье модель управляемого аттенюатора и цепи «направленный ответвитель– детектор–усилитель» предполагается использовать для создания робастной системы АРУ, построенной на основе нечеткой логики.

Литература

1. Matuszczak P. Low cost microwave X-band generator / P. Matuszczak, L. Kulas, K. Nyka // Information Technology (ICIT), 2010 2nd International Conference. – Gdansk: IEEE, 2010. – P. 197–200.

2. Hang Cao. Wideband automatic level control circuit for wideband signal generator application / Cao Hang, Tian Ling, Hong Wei // Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012 International Conference. – Shenzhen: IEEE, 2012. – Vol. 3. – P. 1–4.

3. Li Zhuoming. A high performance automatic level control circuit design // Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), Proceedings 2013 International Conference. – Shenyang: IEEE, 2013. – P. 654–657.

4. Gostev V.I. Control of power of transmitter in data transmission channel with fuzzy controller / V.I. Gostev, N.I. Kunakh // Электроника и связь. – 2005. – № 26. – С. 74–78.

5. Gostev V.I. Mathematical model of an adaptive radio communication channel with the PIDcontroller / V.I. Gostev, N.I. Kunakh., V.A. Velichko // Электроника и связь. – 2005. – № 28. – С. 83–87.

6. Гостев В.И. Модели аттенюатора как элемента системы автоматического регулирования мощности передатчика / В.И. Гостев, В.И. Панченко, А.Л. Ткаченко // Вестник ЧДТУ. – 2007. – № 1, 2. – С. 94–98.

7. Robust Multi-Model Control of an Autonomous Wind Power System / N.A. Cutululis, E. Ceanga, A.D. Hansen, P. Sorensen // Wind Energy. – 2006. – Vol. 9. – P. 399–419.

8. Lee C.Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems using multiple parameter models // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2006. – Vol. 4. – P. 428–437.

9. Multimodel Analysis and Controller Design for Nonlinear Processes / Wen Tan, H.J. Marquez, Tongwen Chen, Jizhen Liu // Computers & Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 28, № 12. – P. 2667–2675.

10. Duan Yubo. Multi-model optimal robust control of nonlinear systems in gap metric / Yubo Duan, Sai Yao, Bin Liu // International Journal of Control and Automation. – 2013. – Vol. 6. – P. 381–392.

11. Jalali A.A. An optimal multiple-model strategy to design a controller for nonlinear processes: A boilerturbine unit / A.A. Jalali, H. Golmohammad // Computers & Chemical Engineering. -2012. $-N_{\odot}$ 46 (15). -P. 48–58.

12. Нэш И. Улучшение возможностей беспроводных передатчиков путем калибровки мощности // Беспроводные технологии. – 2010. – № 4. – С. 60–64.

13. Тартаковский Г.П. Динамика систем автоматической регулировки усиления. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 191 с.

14. Garate J.I. Mixed RF output power control for low power transmitters in mobile cellular terminal // Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium. – Montreal: IEEE, 2006. – Vol. 4. – P. 2760–2766.

15. Caverly R.H. Microwave and RF p-*i*-n-Diode Model for Time-Domain Simulation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No 7. – P. 2158–2164.

16. Caverly R.H. Electrothermal modeling of microwave and RF PIN Diode switch and attenuator circuits // Microwave Symposium Digest (IMS). – Seattle: IEEE, 2013. – C. 1–4.

17. Bryant G.H. Principles of Microwave Measurements // IEE Electrical measurement. – London: Peter Peregrinus, 1997. – 392 p.

18. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

Демьянович Дмитрий Николаевич

Инженер-программист департамента информационно-измерительных систем ЗАО «НПФ «Микран», г. Томск Тел.: +7-923-417-68-92 Эл. почта: sparrow@tpu.ru

Вадутов Олег Самигулович

Канд. техн. наук, доцент каф. промышленной и медицинской электроники (ПМЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета Тел.: +7-913-115-15-13 Эл. почта: vos@tpu.ru

Солдатов Алексей Иванович

Д-р техн. наук, профессор каф. ПМЭ Тел.: +7-952-802-65-41 Эл. почта: asoldatof@mail.ru

Demyanovich D.N., Vadutov O.S., Soldatov A.I. Control object research and model obtaining for the ALC system design

We present a method for constructing models of microwave frequency synthesizer tract for a fixed frequency as a control object for the purpose of further AGC development. Static and dynamic characteristics of the control object were studied. To determine the coefficients of static characteristics of transmission controlled attenuator we used two ranges of values of the control action for three frequencies: 5, 6 and 7 GHz. For the dynamic characteristics of the control object we defined order and coefficients of the equations describing the dependence of the output power from the input power and the control action applied to the attenuator, and the dependence of the output voltage from the detector output. The results of comparative analysis of the model and the real object are given. The developed model corresponds to the real object.

Keywords: controlled attenuator, approximation of the nonlinear characteristic, nonlinear control object, static characteristics, dynamic properties, parametric feedback, model development.