

УДК 621.3.01

Е. Б. Соловьева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Методы линеаризации характеристик усилителей мощности

Рассмотрены высокоэффективные системы усиления, обеспечивающие низкий уровень нелинейных искажений в усилителях мощности с высоким коэффициентом полезного действия. Представлены классификация и сравнительный анализ методов линеаризации характеристик усилителей мощности.

Усилитель мощности, нелинейное искажение, линеаризация

Современные тенденции улучшения качества передачи сигналов и существенного усложнения электромагнитной обстановки объясняют повышение требований к линейности характеристик полосовых усилителей мощности (power amplifier – PA) с высоким коэффициентом полезного действия (КПД), входящих в состав электрических и радиотехнических систем. Методы борьбы с нелинейными искажениями сигналов в усилительных трактах с высокими энергетическими показателями ориентированы на достижение высокой точности линеаризации характеристик PA при действии широкополосных входных сигналов [1].

Методы линеаризации PA согласно принципам их реализации можно разделить на две группы [1]. Первую группу образуют методы, в которых помимо усиленного сигнала формируется сигнал ошибки, модифицирующий воздействие или непосредственно вычитаемый из выходного сигнала. Сигнал ошибки генерируется в системах усиления с обратной связью (ОС) [1]–[3], прямой связью [1] и предискажением сигналов [4]–[6].

Вторую группу образуют методы, обеспечивающие линеаризацию PA схемотехническими решениями. В методах второй группы реализуются: выделение огибающей и ее восстановление (envelope elimination and restoration, EER) [1]; усилитель Догерти [1], [7]; линейное усиление с использованием нелинейных компонент (linear amplification using nonlinear components, LINC) или дефазирование (outphasing power amplifier) [1], [8]; комбинированный аналоговый универсальный модулятор с замкнутой обратной связью

(combined analogue locked loop universal modulator, CALLUM) [1], [2], [8].

Рассмотрим методы линеаризации PA согласно представленной классификации, опишем их достоинства и недостатки, приведем результаты сравнительного анализа.

Система усиления с отрицательной обратной связью. Линеаризация характеристик PA выполняется с помощью охватывающей усилитель обратной связи [1]–[3].

Блок-схема усилителя с ОС изображена на рис. 1. Входной сигнал PA – сигнал ошибки $v_e(t)$, полученный из выражения

$$\begin{aligned} v_e(t) &= v_i(t) - v_r(t) = v_i(t) - \beta v_o(t) = \\ &= v_i(t) - \beta G v_e(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $v_i(t)$ – модулированный входной сигнал структуры; $v_r(t) = \beta v_o(t)$ – сигнал на выходе обратной связи; $v_o(t) = G v_e(t)$ – выходной сигнал PA; G , β – коэффициенты усиления в прямой и обратной связи соответственно.

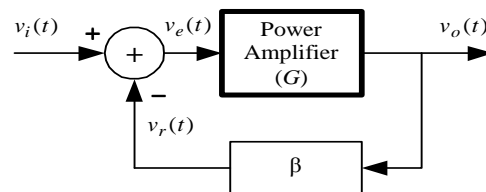


Рис. 1

Коэффициент усиления G_c системы с ОС, показанной на рис. 1, при равенстве

$$v_i(t) = (1 + \beta G) v_e(t),$$

полученном из формулы (1), определяется как

$$G_c = \frac{v_o(t)}{v_i(t)} = \frac{Gv_e(t)}{(1 + \beta G)v_e(t)} = \frac{G}{1 + \beta G}. \quad (2)$$

На основе выражения (2) формула относительного отклонения коэффициента усиления G_c имеет вид

$$\frac{\delta G_c}{G_c} = \frac{1}{1 + \beta G} \frac{\delta G}{G}, \quad (3)$$

где δ – знак девиации.

Достоинство рассматриваемого подхода к линейризации ПА – меньшая относительная вариация $\delta G_c / G_c$ коэффициента усиления G_c (выражение (3)) по сравнению с относительной вариацией $\delta G / G$ коэффициента G усилителя мощности. Недосток подхода – отсутствие причинности в уравнении (1), т. е. временного смещения между сигналами $v_r(t)$ и $v_i(t)$, присутствующего в реальных физических систем.

Синтез ОС в системах усиления зависит от класса воздействия. Рассмотрим схемы ОС при высокочастотном модулированном и низкочастотном модулируемом входных сигналах.

Обратная связь по огибающей (envelope feedback). В системе усиления с ОС по огибающей линейризуется амплитудная характеристика усилителя [1]–[3].

Блок-схема ПА с обратной связью по огибающей изображена на рис. 2. Пиковые детекторы (Peak detector) выделяют огибающие из модулированных входного и выходного сигналов ПА. На основе сравнения огибающих дифференциальный усилитель (differential amplifier – DA) формирует сигнал автоматической регулировки усиления (automatic gain control – AGC) ПА.

На практике пиковые детекторы преобразовывают искаженные модулированные сигналы, поэтому их динамический диапазон должен быть

достаточно высоким, а полоса пропускания – в два раза шире частотного диапазона усиливаемого сигнала [1]–[3].

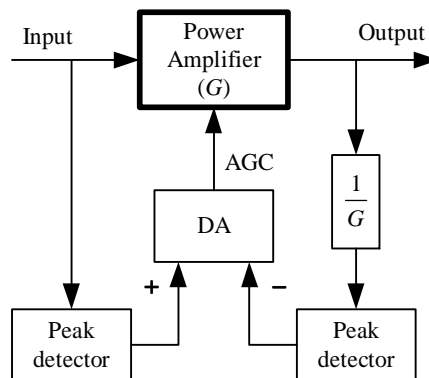


Рис. 2

В рассматриваемом методе усиления при уменьшении амплитудных искажений часто возрастают фазовые искажения. Система усиления, представленная на рис. 2, строится на усилителях классов А, В, АВ [1]–[3].

Обратная связь в полярной системе координат (polar feedback). Метод полярной обратной связи предназначен для коррекции амплитудной и фазовой составляющих входного сигнала, которые образуют полярные координаты [1]–[3]. Для коррекции составляющих строятся две независимые ОС.

Блок-схема системы усиления с полярной обратной связью изображена на рис. 3, где DA (differential amplifier) – дифференциальный усилитель, AGC (automatic gain control) – сигнал автоматической регулировки усиления ПА, AM-Limiter – ограничитель, формирующий фазомодулированный сигнал с единичной амплитудой.

В системе с ОС изменения температуры, напряжения питания и нагрузки влияют на характеристики ПА.

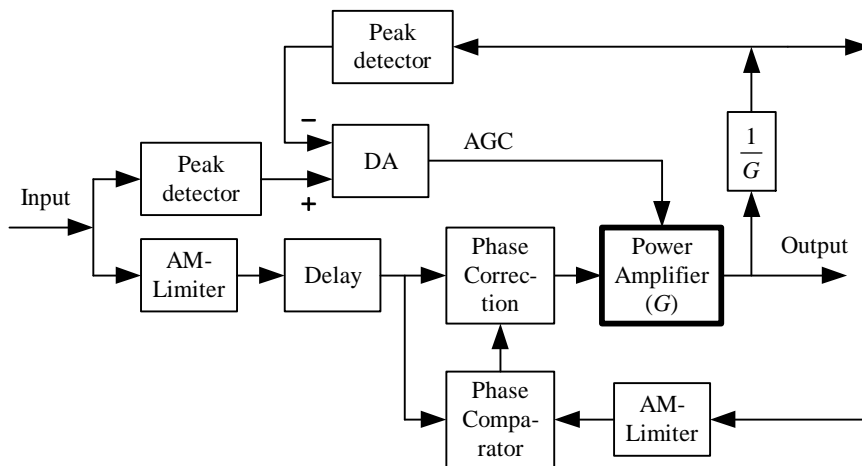


Рис. 3

Недостаток системы с полярной ОС – различие полос пропускания в цепях ОС, предназначенных для управления амплитудой и фазой. В результате точность линейаризации характеристик АМ/АМ и АМ/ФМ, где АМ – амплитудная модуляция, ФМ – фазовая модуляция, различна, что ведет к понижению точности линейаризации РА в целом.

Обратная связь в декартовой системе координат (Cartisian feedback). Блок-схема системы усиления с декартовой обратной связью представлена на рис. 4 [1]–[3]. Особенность системы – присутствие демодулятора в цепи ОС.

Входными сигналами системы служат синфазная $I(t)$ и квадратурная $Q(t)$ составляющие (декартовы координаты) амплитудно-фазового модулированного колебания

$$v_i(t) = A(t) \sin[\omega t + \varphi(t)] = I(t) \sin(\omega t) + Q(t) \cos(\omega t),$$

где $A(t)$, $\varphi(t)$, ω – огибающая, фаза и несущая частота модулированного сигнала соответственно,

$$I(t) = A(t) \cos[\varphi(t)], \quad Q(t) = A(t) \sin[\varphi(t)].$$

Метод декартовой ОС свободен от проблемы рассогласования цепей ОС, присущей методу полярной ОС. Посредством декартовой обратной связи изменения температуры, напряжения питания и нагрузки влияют на характеристики РА. Применение цифровой обработки сигналов открывает новые возможности для аппаратной реализации рассматриваемой системы усиления.

Ключевой проблемой метода декартовой ОС является сохранение устойчивости системы в условиях, когда нелинейный РА создает фазовые сдвиги сигналов в широкой полосе частот, а смесители демодулятора ОС порождают нелинейные эффекты [1]–[3].

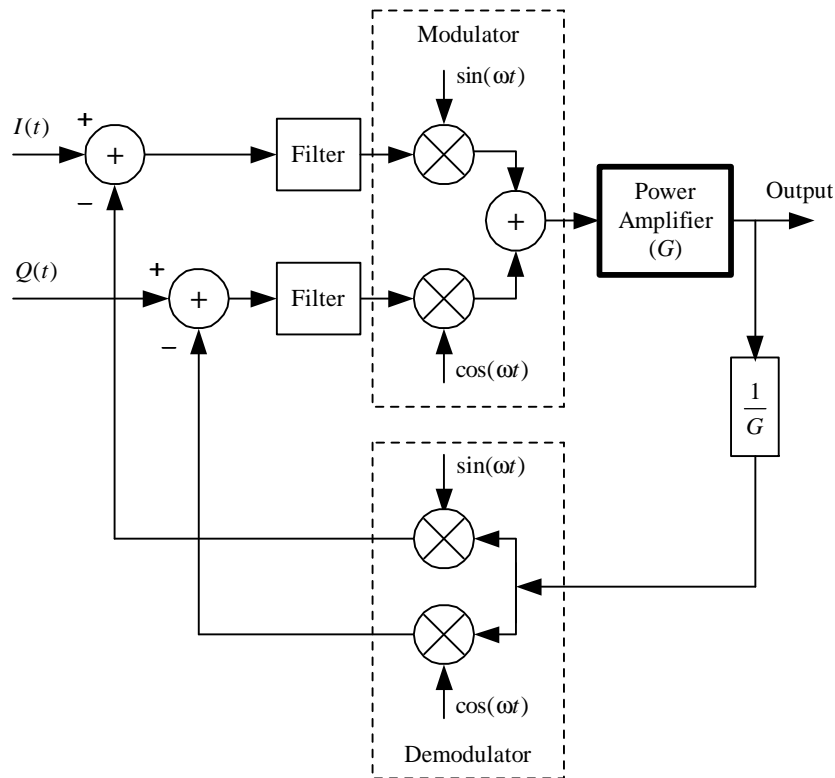


Рис. 4

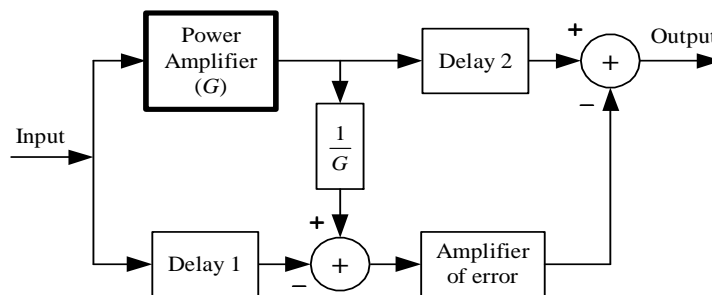


Рис. 5

Система усиления с прямой связью. Блок-схема системы усиления с прямой связью, изображенная на рис. 5, содержит два замкнутых цикла обработки сигналов [1]. Выходной сигнал первого цикла – сигнал ошибки – результат вычитания из выходного сигнала нелинейного РА задержанного в блоке «Delay 1» (линии задержки) входного сигнала системы. Во втором замкнутом цикле сигнал ошибки, усиленный в «Amplifier of error» (усилителе искажений), вычитается из выходного сигнала РА, задержанного в блоке «Delay 2». В результате на выходе системы формируется усиленный сигнал без нелинейных искажений.

Достоинства рассматриваемого метода следующие: система усиления без обратной связи всегда устойчива; коэффициент усиления системы не уменьшается, как это происходит в системе с ОС (2); система усиления является широкополосной; мощность усилителя искажений «Amplifier of error» существенно меньше мощности главного РА.

К недостаткам системы относятся: отсутствие влияния многих факторов (изменения температуры, старения РА и т. д.) на характеристики усилителя; чувствительность к согласованию схемных элементов в рабочей полосе частот выше 45 МГц; большие аппаратные затраты на синтез системы по сравнению с методами обратной связи [1].

Система усиления с предискажением сигналов. Линеаризация характеристик РА возможна посредством предварительного искажения входного сигнала, которое, усиливаясь в РА, компенсирует искажения усилителя.

Предискажение создается в цифровом предискажителе (digital predistorter – DPD), включенном в систему передачи данных, структура которой показана на рис. 6 [4]–[6]. Блоки D/A, A/D – цифроаналоговый и аналого-цифровой преобразователи соответственно; Up Converter, Down Converter – преобразователи, повышающий и снижающий частоту сигнала соответственно.

Линеаризация РА с помощью DPD перспективна, поскольку позволяет повысить КПД усилителя при сохранении его габаритов и без существенного увеличения его стоимости. Повышение линейности РА на 3 дБ эквивалентно увеличению КПД на 4–5 % [6].

При построении DPD требуется найти компромисс между точностью линеаризации РА, аппаратными затратами на синтез DPD, быстродействием алгоритма расчета и скоростью адаптации модели предискажителя. На точность работы DPD влияют помехи, источниками которых служат неидеальные преобразователи из аналоговой области системы передачи данных (рис. 6).

Рассматриваемый метод линеаризации РА с адаптивной и цифровой обработкой сигналов, обладает широкими возможностями: учитывает влияние старения, температуры и других условий на характеристики РА; обеспечивает широкополосность системы усиления; комбинируется с другими методами линеаризации [4]–[6].

Рассмотрим системы усиления, относящиеся ко второй группе классификации и использующие схемотехнические подходы для линеаризации РА.

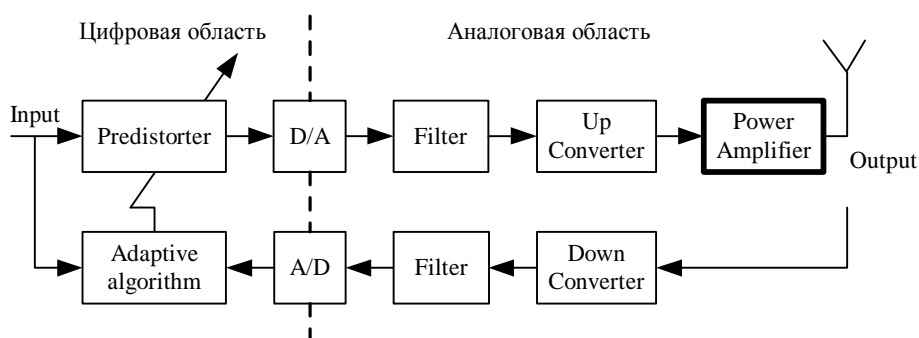


Рис. 6

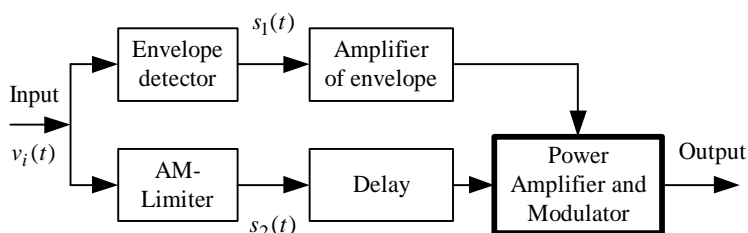


Рис. 7

Выделение огибающей и ее восстановление (envelope elimination and restoration, EER). Метод EER основан на выделении из амплитудно-фазового модулированного сигнала $v_i(t) = A(t) \times \cos(\omega t + \varphi(t))$ двух компонент: низкочастотной огибающей $s_1(t) = A(t)$ и фазомодулированного сигнала с единичной амплитудой $s_2(t) = \cos(\omega t + \varphi(t))$, и их последующей обработке.

В структуре EER-системы, изображенной на рис. 7, выделенная и усиленная низкочастотная огибающая модулируется задержанным во времени фазомодулированным сигналом с единичной амплитудой и усиливается в РА [1]. На рис. 7 Envelope detector – выделитель огибающей из модулированного сигнала; AM-Limiter – ограничитель, формирующий фазомодулированный сигнал с единичной амплитудой; Delay – линия задержки.

Метод EER прост в реализации, поскольку не содержит обратных связей.

EER-система усиления чувствительна к временному рассогласованию амплитудной и фазовой компонент, поэтому для достижения приемлемой точности линеаризации РА необходимо добиться их временной синхронизации [1].

Усилитель Догерти. Классическая архитектура усилителя Догерти, представленная на рис. 8, а, содержит два усилителя: главный усилитель (Main Amplifier) класса В (или АВ) и вспомогательный усилитель (Auxiliary Amplifier) – обычно класса С. Линии с длиной волны $\lambda/4$ предназначены для согласования импедансов [1], [7].

При небольших амплитудах воздействия работает главный усилитель, вспомогательный усилитель отключен. При достижении определенно-

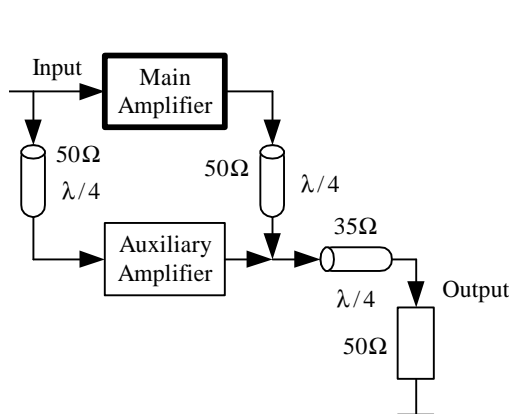
го уровня входного сигнала включается вспомогательный усилитель, после чего на нагрузку поступают сигналы обоих усилителей. Точка включения вспомогательного усилителя выбирается в соответствии со схемой, в которой применяется усилитель Догерти. На рис. 8, б изображена амплитудная характеристика усилителя Догерти, где A_{\max} – максимальная амплитуда выходного сигнала системы усиления.

Эффективность управления входным сигналом с помощью схемных решений (более рационального использования транзисторов по току) позволяет повысить КПД усилителя Догерти при высоких значениях отношения пиковой мощности к средней мощности, характерных для современных систем связи (для оборудования сетей сотовой связи и широкополосного радиодоступа стандартов W-CDMA, CDMA200, LTE и WiMax) [1], [7].

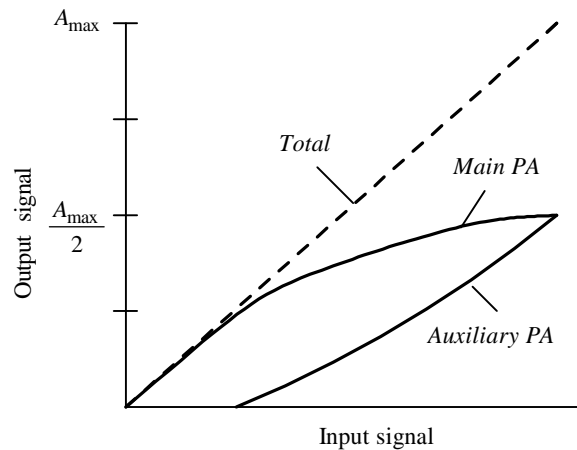
Недостаток усилителя Догерти – его узкополосность. Расширить полосу пропускания и динамический диапазон системы усиления можно введением большего числа вспомогательных усилителей и применением цифровой технологии [1], [7].

Линейное усиление с использованием нелинейных компонент (linear amplification using nonlinear components, LINC) или дефазирование (outphasing power amplifier). Метод LINC [1], [8] основан на представлении амплитудно-фазового модулированного сигнала $v_i(t)$ в виде суммы двух фазомодулированных сигналов $v_1(t)$ и $v_2(t)$ следующим образом:

$$v_i(t) = A(t) \cos[\omega t + \varphi(t)] = \cos\{\arccos[A(t)]\} \cos[\omega t + \varphi(t)] = v_1(t) + v_2(t),$$



а



б

Рис. 8

где

$$v_1(t) = 1/2 \cos \{ \omega t + \varphi(t) + \arccos [A(t)] \},$$

$$v_2(t) = 1/2 \cos \{ \omega t + \varphi(t) - \arccos [A(t)] \}.$$

Блок-схема LINC изображена на рис. 9. В рассматриваемом методе сформированные фазомодулированные сигналы с постоянной амплитудой усиливаются по отдельности и на выходе системы объединяются.

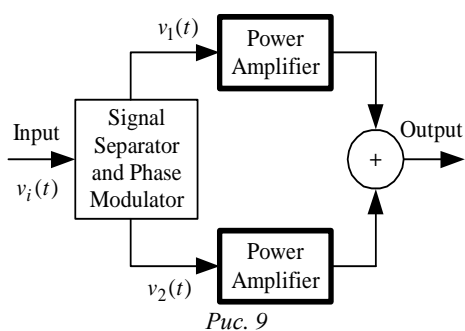


Рис. 9

Высокая линейность LINC-системы достигается применением цифровых технологий. Аналоговая реализация метода порождает ограничения, в частности, при вычислении функции \arccos [1], [8].

Точность усиления зависит от линейности и фазовой согласованности входящих в LINC-систему усилителей.

Комбинированный аналоговый универсальный модулятор с замкнутой обратной связью (combined analogue locked loop universal modulator, CALLUM). Принцип CALLUM-метода, как и LINC-метода, – усиление двух сигналов с постоянной огибающей в независимых усилителях мощности [1], [2], [8]. Входными сигналами CALLUM являются синфазная $I(t)$ и квадратурная $Q(t)$ составляющие (декартовы координаты) модулированного колебания

$$v_i(t) = I(t) \sin(\omega t) + Q(t) \cos(\omega t).$$

Блок-схема CALLUM изображена на рис. 10. В дифференциальных усилителях DA (differential amplifier) из указанных воздействий вычи-

таются соответствующие компоненты, полученные демодуляцией выходного сигнала системы. В результате формируются сигналы ошибки, которые управляют напряжениями генераторов VCO I, VCO Q (voltage controlled oscillator). Выходные сигналы генераторов усиливаются в PA с коэффициентами GI и GQ , а затем суммируются, образуя выходной сигнал.

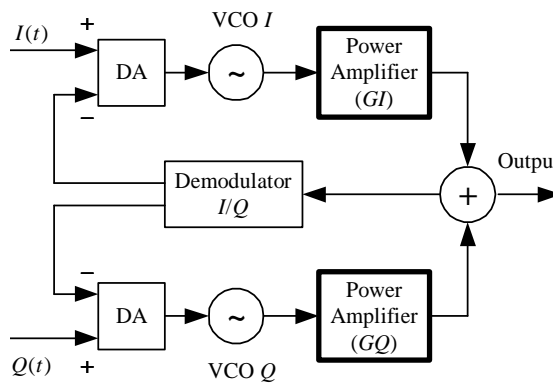


Рис. 10

Для синтеза CALLUM успешно применяется цифровая технология, обеспечивающая высокую линейность системы усиления.

Главная проблема CALLUM – возможность потери стабильности и линейности устройства из-за дисбаланса генераторов, управляемых напряжением. Стабильность CALLUM удается поддерживать в узкой полосе частот [1], [2], [8].

В таблице представлены результаты сравнительного анализа рассмотренных систем усиления при оценке их следующих свойств:

- степени линейизации характеристик PA,
- способности преобразовывать широкополосные сигналы,
- степени сложности преобразований, влияющей на аппаратную реализацию системы.

Достоинства и недостатки рассмотренных методов усиления обуславливают специфики их применения.

Из анализа данных таблицы следует, что высокоэффективной и, следовательно, перспективной является система усиления с предсказанием сиг-

Номер группы	Метод линейизации		Сложность метода	Степень линейизации	Полоса пропускания
1	Обратная связь	Envelope	Средняя	Низкая	Средняя
		Polar	Высокая	Высокая	Узкая
		Cartesian	Высокая	Высокая	Узкая
	Прямая связь	Высокая	Высокая	Средняя	
	Предсказание	Высокая	Высокая	Широкая	
2	EER		Средняя	Средняя	Узкая
	Усилитель Догерти		Высокая	Высокая	Узкая
	LINC		Высокая	Высокая	Средняя
	CALLUM		Высокая	Высокая	Узкая

налов. Для построения предсказателя (DPD) применяются разные математические модели (многочленные полиномы, нейронные сети, регрессионные

структуры) [4]–[6]. Аппаратная реализация DPD выполняется на базе цифровой техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Legarda J. Feedforward amplifiers for wideband communication systems. The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006.
2. Dawson J. L., Lee T. H. Feedback linearization of RF power amplifiers. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
3. Cripps S. C. RF Power amplifiers for wireless communications. London: Artech House, Inc., 2006.
4. Guan L., Zhu A. Green communications: digital predistortion for wideband RF power amplifiers // IEEE Microwave Magazine. 2014. Vol. 15, № 7. P. 84–99.
5. Соловьева Е. Б. Декомпозиция кусочно-полиномиальной модели предсказателя для усилителя мощности // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2015. № 2. С. 54–60.
6. Соловьева Е. Б. Полиномиальные и нейронные модели нелинейных дискретных систем. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.
7. Grebennikov A., Sokal N. O., Franco M. J. Switch-mode RF and Microwave Power Amplifiers. UK: Elsevier Inc., 2012.
8. Kazimierczuk M. K. RF Power Amplifiers. USA: John Wiley & Sons Ltd., 2008.

Е. В. Соловьева

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

METHODS OF POWER AMPLIFIER CHARACTERISTIC LINEARIZATION

Highly effective amplification systems providing a low level of nonlinear distortions in power amplifiers with high efficiency are described. The classification and comparative analysis of the power amplifier linearization methods are represented.

Power amplifier, nonlinear distortion, linearization

УДК 621.34

Л. П. Козлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Построение прецизионного электропривода с вентильным двигателем

Рассмотрено современное состояние прецизионного электропривода с вентильными двигателями. Для элементарной модели приведена структура и математическая модель, выполнено исследование в MatLab Simulink.

Вентильный двигатель, математическая модель, прецизионный электропривод

Основными потребителями электроэнергии в настоящее время являются электродвигатели, поэтому задача оптимального управления ими весьма актуальна не только с технологической точки зрения, но и с точки зрения энергосбережения. Во многих развитых странах широко внедряют высокотехнологичную электротехническую продукцию, позволяющую снижать энергопотребление и создавать электротехнические комплексы с низким уровнем потерь и целым рядом новых качеств.

Для решения задач контролируемого движения в современных прецизионных системах все чаще применяются вентильные двигатели. Они обеспечивают наиболее высокие плотность длительного момента (момент в единице объема) и энергетическую эффективность по сравнению с любым другим типом двигателя; у них хорошее соотношение между весом/размером и мощностью, отличные характеристики ускорения, они практически не требуют технического обслужи-