

ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА

ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

Решение различных задач гидроакустики требует создания акустического сигнала широкой полосы. Для его формирования в нелинейной водной среде применяются антенны, излучающие мощные колебания накачки. Предлагаемые генераторные устройства, удовлетворяющие их жестким требованиям, выполнены на транзисторных усилителях мощности в ключевом режиме. Экспериментальные исследования подтверждают высокое качество сигналов возбуждения антенны.

Для ряда областей военной и гражданской гидроакустики – миноискания, звукоподводной связи, эхоледомеров, навигации, рыбопоискового промысла, геофизики моря (томография, профилирование придонных структур), исследования Мирового океана – большой интерес представляют антенны, излучающие широкополосные сигналы низкой частоты и высокого уровня мощности (от 10 до 100 кВт). Это так называемые параметрические излучающие антенны (ПИА). Их принцип работы основан на параметрическом преобразовании в водной нелинейной среде высокочастотных колебаний частот накачки f_1 и f_2 в сигнал биений низкой частоты, равной $F = f_1 - f_2$ [1–4].

ПИА обладают такими уникальными свойствами, как формирование узкой диаграммы направленности (ДН) при малом раскрыве антенны, низкий уровень боковых лепестков и ненаправленного излучения (ореола) ДН, постоянство ДН в широкой полосе частот – ширина основного лепестка сохраняется в пределах всего диапазона F , который достигает 5–6 октав. Эти свойства реализуются только при использовании высокоэффективной передающей аппаратуры, отвечающей специфическим требованиям к качеству сигналов возбуждения ПИА.

ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРЕДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ТРАКТОВ

Плата за уникальные свойства ПИА – снижение энергетической эффективности преобразования. Только незначительная часть акустической мощности, генерируемой на частотах накачки, преобразуется в мощность колебаний разностной частоты (биений). Из общей теории параметрических антенн [1] известно, что энергетическая эффективность возрастает практически пропорционально мощности излучения сигналов частот накачки, поэтому наиболее доступный способ ее повышения – увеличение мощности первичных акустических колебаний.

В.Александров,
Д.Островский,
М.Сиверс

К передающей аппаратуре параметрических трактов предъявляются также особые требования в отношении спектра сигнала возбуждения антенны. Если необходимо реализовать ПИА на разностной частоте F , в спектре сигнала возбуждения должны присутствовать в основном сигналы первичных частот f_1 и f_2 и допустимы также их ВЧ-комбинации и гармоники. При этом низкочастотные комбинационные составляющие первичных акустических колебаний должны быть весьма малы, чтобы на результирующей ДН не поднялся уровень ореола.

Специальное требование к излучающему тракту – уровень собственного слабонаправленного НЧ-излучения должен быть не более $-(80-90)$ дБ относительно уровня излучения на основных частотах f_1 и f_2 . С учетом резонансных свойств излучающей ВЧ-антенны, обеспечивающей подавление составляющих разностной частоты более чем на 30–40 дБ, допустимый уровень НЧ-искажений выходного сигнала передающей аппаратуры не превышает $-(46-50)$ дБ. При этом ВЧ-компоненты сигнала могут составлять $-(15-25)$ дБ от основных составляющих частот накачки.

Представляем авторов статьи

АЛЕКСАНДРОВ Владимир Александрович. Кандидат технических наук. Ведущий научный сотрудник ЦНИИ “МОРФИЗПРИБОР”. Окончил Ленинградский военно-механический институт. Автор свыше 100 научных работ. Сфера профессиональных интересов – передающие тракты гидроакустических систем.

ОСТРОВСКИЙ Дмитрий Борисович. Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник ЦНИИ “МОРФИЗПРИБОР”. Окончил Ленинградский электротехнический институт им.В.И.Ульянова (Ленина). Автор свыше 100 научных работ. Сфера профессиональных интересов – гидроакустические системы.

СИВЕРС Мстислав Аркадьевич. Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой Государственного университета телекоммуникаций им.проф. М.А.Бонч-Бруевича. Окончил Ленинградский политехнический институт. Автор свыше 100 научных работ. Сфера профессиональных интересов – теория построения радиопередающих устройств.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ НАКАЧКИ

По методу возбуждения источники сигналов частот накачки ПИА разделяются на двухканальные и одноканальные, предполагающие электрическое либо акустическое сложение колебаний двух частот. Для передающей аппаратуры двухканальной ПИА применение раздельного усиления составляющих сигнала биений обусловлено традиционным принципом построения излучающего тракта (рис. 1а). При одноканальной ПИА передающая аппаратура может быть реализована как по одноканальной, так и по двухканальной схемам, использующим, соответственно, суммирование составляющих сигнала биений по входу (рис. 1б) или по выходу (рис. 1в) усилителей мощности.

Требование малого уровня низкочастотных комбинационных составляющих, проникающих в область частот $(0-2)F$, в ряде случаев ограничивает применение одноканальной схемы передающей аппаратуры с формированием суммарного сигнала на входе усилителя мощности. Сигнал биений, имеющий широкий динамический диапазон, может быть усилен с требуемым качеством только при очень высокой линейности амплитудной характеристики усилителей мощности, достижение которой весьма сложно даже у измерительных усилителей, специально предназначенных для работы с акустическими излучающими антеннами.

Применение линейных усилителей в параметрических излучающих трактах сдерживается, кроме того, их низкой энергетической эффективностью. В частности, если при усилении тональных сигналов КПД усилителей класса В достигает 70%, то при усилении сигнала биений он не превышает 50%. Такие же энергетические характеристики достигаются при использовании линейных усилителей в двухканальной схеме (см. рис. 1в) возбуждения ПИА, обеспечивающей формирование сигнала биений в результате сложения выходных сигналов усилителей мощности. И все же одноканальный метод параметрического излучения очень перспективен при стремлении снизить объем аппаратной части и упростить конструкцию акустических антенн.

Для достижения высоких энергетических характеристик и показателей качества передающей аппаратуры более выигрышна двухканальная ПИА. Здесь отдельные усилители мощности обеспечивают возбуждение отдельных каналов излучающей антенны на соответствующих частотах сигналов накачки. Однако преимущество двухканальной ПИА проявляется только при отсутствии взаимного влияния между раздельными акустическими излучателями, что выполнить весьма затруднительно в мощных акустических антеннах с высоким коэффициентом заполнения раскрыва.

В современных гидроакустических комплексах используются транзисторные усилители, обладающие линейностью амплитудной характеристики в широком динамическом диапазоне. Однако большие потери мощности на усилительных элементах обуславливают значительные габариты таких устройств, и их удельная выходная мощность, как правило, не превышает 15–20 ВА/дм³. Несколько лучшими удельными характеристиками (25–35 ВА/дм³) обладает передающая аппаратура на основе мощных ламповых усилителей, специально предназначенных для применения в гидроакустических излучающих трактах.

Существенного улучшения энергетических и массогабаритных показателей усилителей мощности можно достичь применением ключевого режима работы усилительных приборов [5]. Он также позволяет наилучшим образом разрешить противоречия между энергетическими характеристиками и показателями качества выходных сигналов передающей аппаратуры ПИА. В ключевом режиме выходное сопротивление усилителя мощности мало (как прави-

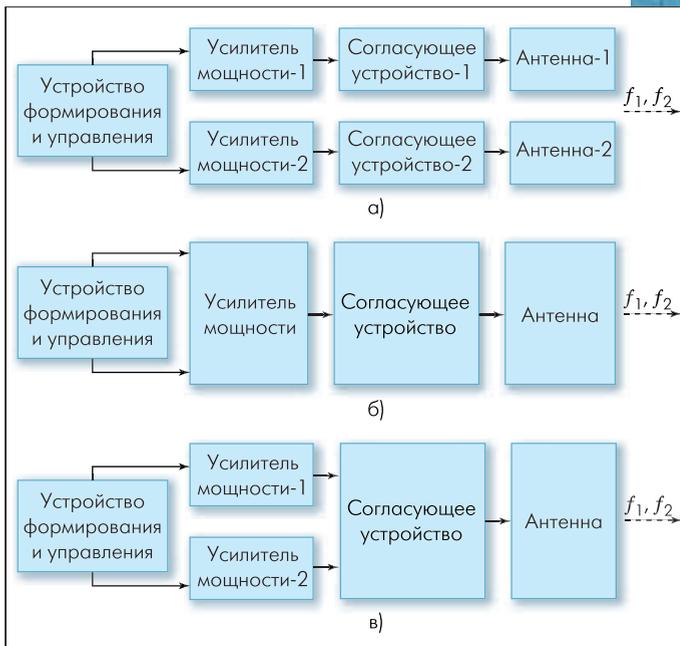


Рис. 1. Структурные схемы параметрических излучающих трактов: а) двухканальный режим возбуждения; б) одноканальный режим возбуждения; в) одноканальный режим возбуждения

ло, не более 0,2–0,5 Ом), что определяется низким относительным остаточным напряжением на ключевых элементах. Так, например, при коммутируемом напряжении порядка 300 В и максимальном выходном токе до 10 А падение напряжения на элементах усилителя не превышает 5–10 В, что соответствует статическим потерям мощности не более 2–3%.

Благодаря малому выходному сопротивлению усилитель в ключевом режиме близок к идеальному генератору симметричного импульсного напряжения, в спектральном составе которого практически отсутствуют четные гармоники выходного сигнала, а первую гармонику легко выделить на нагрузке фильтрами второго и высших порядков. При последовательном сложении выходных сигналов усилителя, работающих на различных частотах, влияние суммарного выходного тока на форму результирующего импульсного напряжения также мало.

В схемах усиления ключевого режима помимо статических потерь мощности и искажений, обусловленных конечным остаточным напряжением открытых ключей, важное значение имеют динамические потери мощности и искажения, обусловленные конечным временем их переключения. На практике для частот переключений 20–50 кГц относительные динамические потери мощности не превышают 3–5%. Временные задержки переключений ключевых элементов t_3 , выполненных на мощных биполярных транзисторах типа 2Т841А, 2Т847А, 2Т878А, не превышают 1 мкс, в результате чего для периода сигнала $T = 50-20$ мкс относительная величина t_3/T равна $t_3/T = 0,02-0,05$. Искажения сигнала биений, обусловленные несимметричностью инерционных свойств таких приборов, не превышают $(0,1-0,2)t_3$.

Таким образом, усилители мощности в ключевом режиме, выполненные по двухканальной схеме при раздельном усилении сигналов двух частот накачки (см. рис. 1в), обеспечивают формирование суммарного сигнала биений в антенне в заданной полосе рабочих частот с низкочастотными искажениями не более $-(40-46)$ дБ. При этом КПД таких двухканальных усилителей с учетом потерь мощности в элементах резонансного фильтра может достигать 85–95%.

Высокая энергетическая эффективность устройств усиления в ключевом режиме и удовлетворительные показатели качества сигнала биений делают применение двухканальных усилителей наиболее предпочтительным. Структурные схемы передающих трактов с разделным усилением мощности сигналов частот накачки в ключевом режиме и диаграммы напряжений, поясняющие их работу, приведены на рис.2а и 2б. Наиболее простой способ реализации тракта разделного ключевого усиления сигналов u_1 и u_2 соответственно двух частот f_1 и f_2 – двухканальный усилитель, выполненный по эффективной мостовой схеме. Управление каналами такого усилителя осуществляют импульсные сигналы частот накачки, полученные путем ограничения исходных сигналов u_1 и u_2 . В результате на выходах полумостовых схем усилителей мощности с напряжением питания E формируются импульсные напряжения (см. рис.2а), определяемые как

$$V_1(t) = 0,5E\text{sign}[u_1(t)],$$

$$V_2(t) = 0,5E\text{sign}[u_2(t)].$$

Напряжение в диагонали мостовой схемы $V(t) = V_1(t) + V_2(t)$ представляет собой импульсный сигнал биений, составляющие частот накачки которого легко могут быть выделены простейшим резонансным фильтром. Передающий тракт такого типа обеспечивает возбуждение ПИА сигналом биений заданной амплитуды:

$$U = \frac{2E[K_\phi(\omega_1)\sin(\omega_1 t + \phi_1) + K_\phi(\omega_2)\sin(\omega_2 t + \phi_2)]}{\pi}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$, а $K_\phi(\omega_1)$, $K_\phi(\omega_2)$ и ϕ_1 , ϕ_2 – соответственно амплитудные и фазовые характеристики передачи фильтра на данных частотах накачки.

Как следует из выражения (1), регулировку амплитуды сигнала биений можно производить только путем соответствующего изменения напряжения питания E . На практике для передающих трактов большого уровня мощности ($P_{\text{Вых}}=10-100$ кВА) реализация регулируемого преобразователя напряжения представляет сложную техническую задачу, решение которой приводит к значительному (в 1,5–2 раза) увеличению габаритов передающей аппаратуры и к заметному увеличению потерь мощности (КПД не более 80%). Кроме того, управление амплитудой посредством изменения напряжения электропитания мостовой схемы усилителя мощности не предполагает отдельной регулировки составляющих частот накачки,

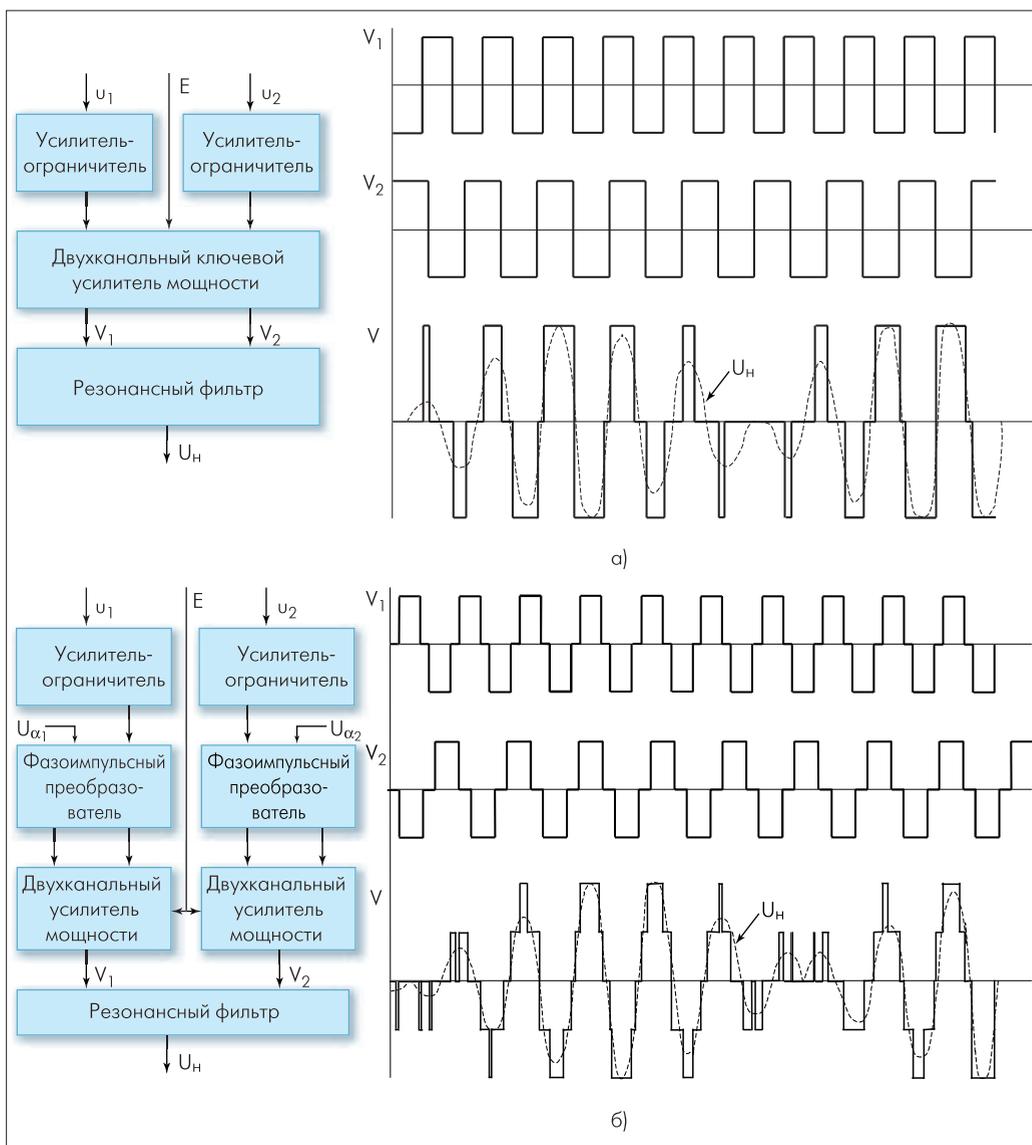


Рис.2. Структурные схемы передающих трактов одноканальной ПИА на основе двухканальных усилителей мощности в ключевом режиме и временные диаграммы сигналов: а) тракт с разделным ключевым усилением двухуровневых импульсных сигналов; б) тракт с разделным ключевым усилением трехуровневых импульсных сигналов

ки, что в ряде случаев [при $K_\phi(\omega_1) \neq K_\phi(\omega_2)$] является необходимым условием возбуждения сбалансированного сигнала биений.

Отмеченные недостатки могут быть преодолены при реализации передающего тракта на основе двухканальных усилителей мощности ключевого режима с фазоимпульсной модуляцией сигналов частот накачки (см. рис.2б) [6]. Передающий тракт такого типа содержит два канала, каждый из которых выполнен на основе усилителя-ограничителя, фазоимпульсного преобразователя и двухканального усилителя мощности в ключевом режиме. Для первого и второго каналов передающего тракта выходные импульсные напряжения V_1 , V_2 имеют три уровня ($+E$; 0 ; $-E$) и могут быть представлены в следующем виде:

$$V_1(t) = 0,5E[\text{sign} u_1(t) - \text{sign} u_1(t - t_{u1})],$$

$$V_2(t) = 0,5E[\text{sign} u_2(t) - \text{sign} u_2(t - t_{u2})],$$

где t_{u1} и t_{u2} – управляемые задержки фронтов и спадов импульсных напряжений частот накачки f_1 и f_2 , формируемые в пределах $t_{u1} \leq 0,5/f_1$ и $t_{u2} \leq 0,5/f_2$ фазоимпульсными преобразователями пропорционально сигналам управления. Амплитуда первых гармоник



импульсных напряжений сигналов частот накачки задается относительной длительностью импульсов: $\alpha_1 = 2t_{u1} \cdot f_1$; $\alpha_2 = 2t_{u2} \cdot f_2$.

В этом случае, с учетом коэффициентов передачи выходного фильтра, сигнал биений определяется следующим образом:

$$U_{max} = \frac{2E}{\pi} [\arcsin 0,5\pi\alpha_1 \cdot K_{\phi}(\omega_1) \cdot \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \arcsin 0,5\pi\alpha_2 \cdot K_{\phi}(\omega_2) \cdot \sin(\omega_2 t + \phi_2)].$$

При необходимости различие коэффициентов передачи $K_{\phi}(\omega_1)$, $K_{\phi}(\omega_2)$ может быть скомпенсировано соответствующим изменением относительных задержек α_1 и α_2 .

Метод отдельного ключевого усиления сигналов частот накачки с фазоимпульсной модуляцией позволяет обеспечить регулировку мощности результирующего сигнала биений соответствующим изменением относительной длительности импульсов α_1 и α_2 без изменения уровня напряжения электропитания. При этом электропитание оконечных каскадов усилителей мощности может осуществляться постоянным нестабилизированным напряжением, в частности непосредственно от первичной электросети. Так, при электропитании от трехфазной сети 220 В (50 Гц) двухканальные усилители мощности могут быть выполнены по мостовой схеме на биполярных транзисторах 2Т841А, адаптированных к напряжению электропитания до 400 В. Для электропитания от трехфазной сети 380 В (50 Гц) может быть рекомендован двухканальный усилитель мощности на двух полумостовых оконечных каскадах, включенных последовательно по шинам электропитания [7]. Таким образом реализуется однозвенная схема передающей аппаратуры мощных ПИА без дополнительных звеньев преобразования напряжения электропитания. Схема передающего тракта такого типа характеризуется максимальной энергетической эффективностью и наилучшими массогабаритными показателями при одновременном выполнении требований к спектру выходного сигнала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотренный вариант передающего тракта с фазоимпульсной модуляцией реализован в экспериментальном образце 10-канального генераторного устройства (ГУ), обеспечивающего возбуждение ПИА в диапазоне частот накачки от 12 до 20 кГц с суммарной выходной мощностью до 30 кВА. Экспериментальные исследования диаграмм направленности ПИА, спектров сигналов возбуждения антенны и сформированных в водной среде акустических колебаний для передающей аппаратуры канала, содержащей ключевую транзисторную ГУ с выходной мощностью до 3 кВА, были проведены в гидроакустическом измерительном бассейне.

Результаты измерений ДН антенны представлены на рис.3. Сравнение характеристик направленности сигнала разностной частоты при возбуждении ПИА от передающей аппаратуры различного типа подтверждает преимущество применения транзисторного

ключевого ГУ (см. рис.3а). При отдельном ключевом усилении сигналов частот накачки уровень НЧ-ореола ПИА значительно ниже ореола ДН на частотах сигналов накачки.

Спектрограммы сигналов возбуждения излучающей антенны при отдельном ключевом усилении сигналов частот накачки представлены на рис.4. Там же приведены спектрограммы сигналов от измерительных гидрофонов, размещенных на расстоянии 20 м от антенны по линии основного максимума ДН. Можно видеть, что комбинационные составляющие в районе разностных частот $F = (0,1-0,2)f$ (где $f = (f_1 + f_2)/2$ – центральная частота диапазона частот накачки) в спектре сигнала возбуждения антенны не превышают $-(50-56)$ дБ от амплитуд сигналов частот накачки. При этом в спектре сигнала от измерительного гидрофона составляющие сигнала разностной частоты присутствуют на уровне -40 дБ.

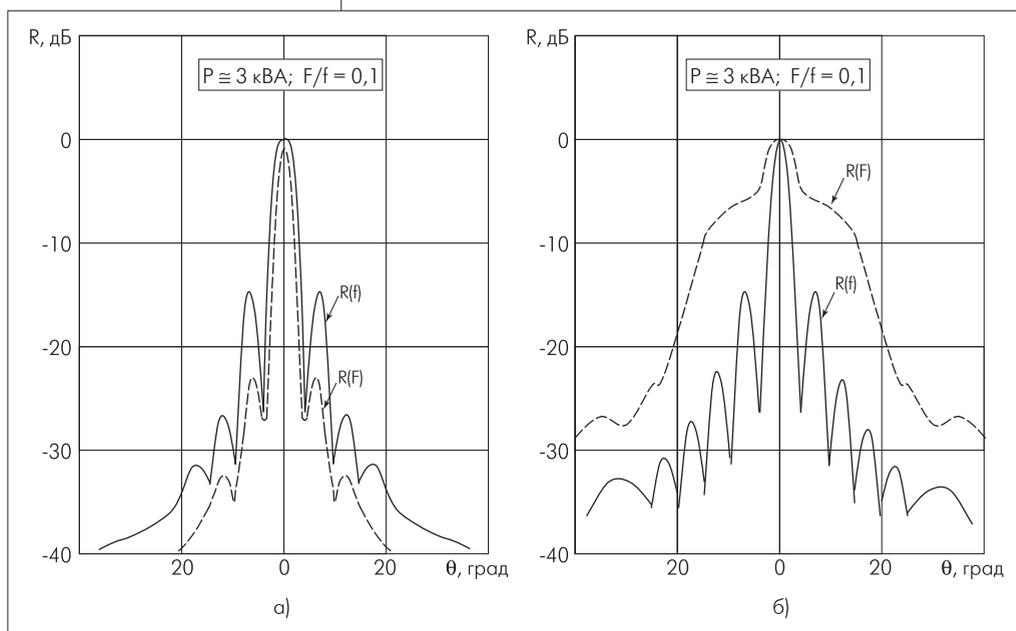


Рис.3. Диаграммы направленности ПИА на высоких R(f) и низких R(F) частотах: а) при возбуждении от транзисторного генератора в ключевом режиме; б) при возбуждении от линейного лампового усилителя

Экспериментальные исследования подтвердили возможность использования высокоэффективных устройств ключевого усиления в передающей аппаратуре параметрических излучающих трактов. Передающие тракты, реализующие метод отдельного ключевого усиления сигналов частот накачки с их дальнейшим сложением и резонансной фильтрацией, обеспечивают, помимо высокого КПД, требуемые показатели качества сигналов биений для возбуждения узконаправленных ПИА.

Метод отдельного ключевого усиления с фазоимпульсной модуляцией реализован в экспериментальном ГУ, примененном на научно-исследовательском судне "Академик Иоффе" в составе исследовательского гидроакустического комплекса на основе ПИА. Основные характеристики излучающей антенны:

Акустическая мощность макс. 20 кВт
Электроакустический КПД 60%
Резонансная частота 14,7 кГц
Чувствительность в режиме излучения 4,2 кПа·м/В
Размеры раскрыва 0,9x1,3 м
Ширина ДН на резонансной частоте 6x4,8 град
Масса 300 кг

В экспедиционных исследованиях были оценены основные технические показатели двух вариантов передающих трактов ПИА, выполненных на основе ключевых усилителей УШ-202 и штатных усилителей LPA 6000 фирмы Hollming Electronics. Сопоставительные

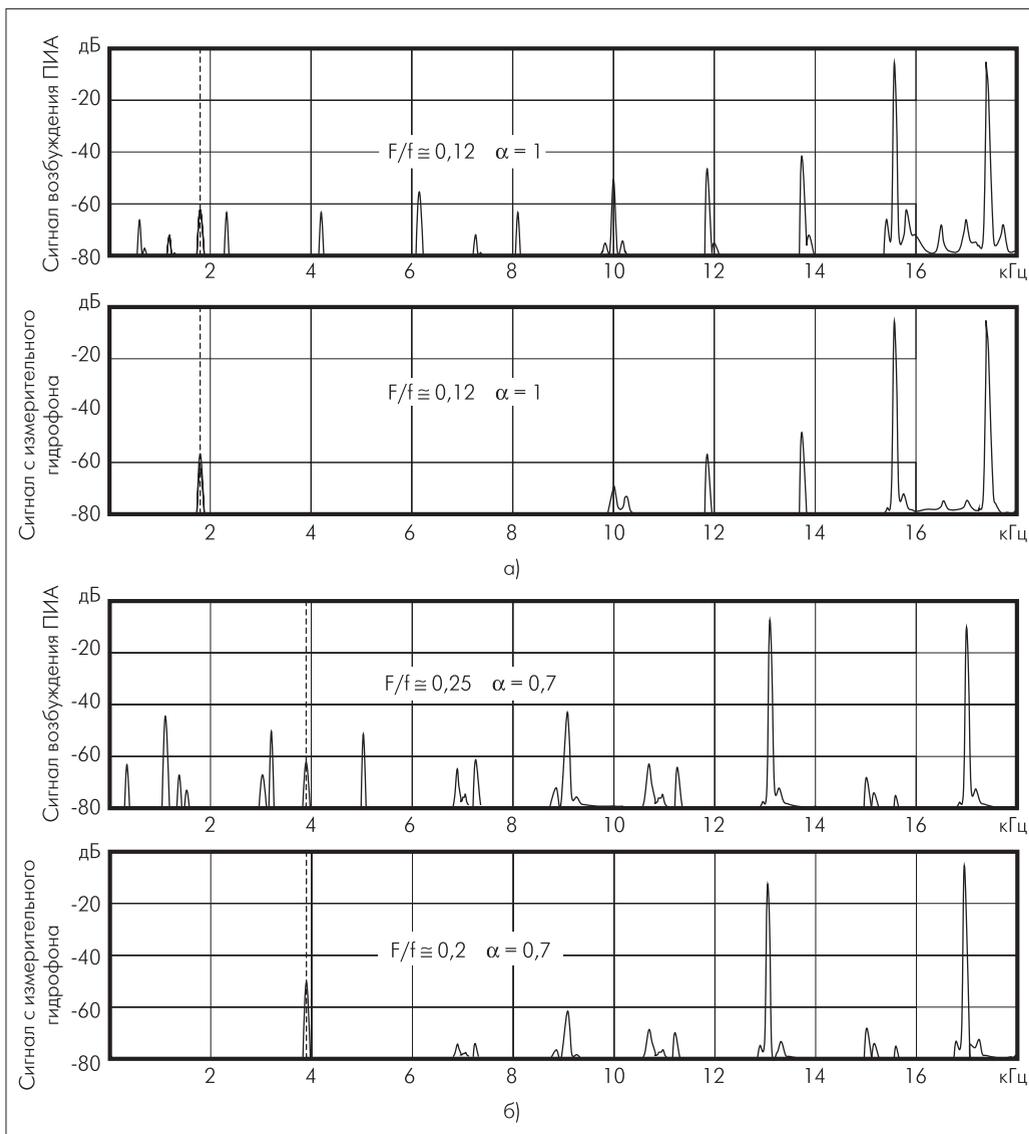


Рис.4. Спектры сигналов возбуждения ПИА и сигналов с измерительного гидрофона для передающего тракта с раздельным ключевым усилением сигналов частот накачки: а) спектры сигналов для $f_1=17,3$ кГц; $f_2=15,5$ кГц; $P_{\text{вых}} \approx 3$ кВА; б) спектры сигналов для $f_1=16,9$ кГц; $f_2=13,0$ кГц; $P_{\text{вых}} \approx 3$ кВА

результаты оценки основных характеристик передающих трактов представлены в таблице.

Приведенные данные показывают преимущество энергетических и массогабаритных показателей передающего тракта на основе ключевых усилителей мощности. Габариты экспериментального генератора в пять раз меньше габаритов штатной аппаратуры, а КПД выше, чем у линейных усилителей, в 2–3 раза. При равной выходной мощности пере-

YYYYYYYY YYYYYYYYUY YYYYYYYYUY YYYUYYYYYYYY YYYUY YYYYYYYY
 YYYYYYYYUY YYYUY

Параметр	Вариант на LPA 6000	Вариант на УШ-202
Метод усиления	Линейный класс АВ	Ключевой класс D
Суммарная выходная мощность, кВА	30	30
Число приборов	10	2
Суммарный объем, м³	3,5	0,6
Удельная выходная мощность канала усиления, ВА/дм³	20	200
КПД при максимальной выходной мощности, %	30–40	80–90
Максимальная мощность потерь, кВт	80	6
Мощность потребления от первичной электросети, кВт	110	36
Искажения сигнала биений в области низких частот, %	0,3	0,5

дающих трактов ($P_{\text{вых}} \approx 30$ кВА) мощность потребления штатной аппаратуры в три раза выше, чем у экспериментального генератора.

Следует отметить, что по показателям качества сигнала генераторные устройства на ключевых усилителях мощности уступают высококачественному линейному усилителю. Основные искажения сигнала биений при раздельном ключевом усилении обусловлены инерционностью ключевых элементов, что особенно проявляется с ростом частоты сигналов накачки. Повышенный уровень низкочастотных комбинационных составляющих выходного сигнала экспериментального генератора обусловлен применением мощных биполярных транзисторов 2Т841А, обладающих значительной инерционностью выключения.

Показатели качества ключевых ГУ можно улучшить, если их оконечные каскады выполнить на современных полевых транзисторах, выпуск которых освоен отечественной промышленностью. Так, мощные полевые транзисторы КП809А,Б по коммутируемому напряжению (до 400–500 В) и току (до 20–25 А) не уступают мощным биполярным транзисторам и значительно превосходят их по скорости переключения.

Разработка и экспериментальные испытания ГУ на полевых транзисторах в ключевом режиме для параметрического излучающего тракта гидроакустического исследовательского комплекса подтвердили возможность существенного улучшения показателей качества сигнала возбуждения ПИА. ГУ на полевых транзисторах с раздельным ключевым усилением сигналов частот накачки имеют следующие технические характеристики [4]:

Напряжение электропитания	220 В (50 Гц)
Выходная мощность	макс. 5 кВА
Частотный диапазон выходных сигналов	25–35 кГц
Согласованный импеданс нагрузки	8 ± 3 Ом
Неравномерность АЧХ	≤ 2 дБ
Коэффициент гармонических искажений	$\leq 5\%$
Низкочастотные комбинационные искажения	$\leq 0,2\%$
КПД	85%
Габаритные размеры блока	485x450x530 мм
Масса блока	40 кг

Генераторное устройство обеспечивает одночастотный и двухчастотный режимы работы как от внешних, так и от собственных задающих генераторов. В устройстве предусмотрена возможность плавного управления мощностью выходного сигнала посредством фазоимпульсной модуляции импульсных последовательностей на входах



ключевых усилителей. Реализация режимов защиты от токовой перегрузки, выхода напряжения электропитания за допустимые пределы, превышения частоты сигналов накачки рабочего диапазона обеспечивает надежное функционирование устройства в экспедиционных условиях.

Результаты разработок и экспериментальных исследований передающей аппаратуры ПИА позволяют рекомендовать генераторные устройства на основе ключевых усилителей мощности для реализации высокоэффективных излучающих трактов различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Новиков Б.К., Тимошенко В.И.** Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990.
2. **Fay J., Kirsteins I.P., Mehta S.K., MacLeod R.B.** Detection and Imaging of Bottom/Buried Mines in Clutter. – Underwater Defence Technology (UDT). Europe99. Proc., 1999, p. 158–162.
3. **Kaskel H., Schwalbe J.** Parametric Array Doppler Sonar (PADS). – Intern. Naval Technology EXPO-78. Proc., 1978, p. 590–597.
4. **Александров В.А., Железный В.Б., Островский Д.Б., Чернуха В.А.** Универсальные генераторы для обеспечения томографии и профилирования традиционным и параметрическим методами. – Сб. тезисов докладов 1-й Санкт-Петербургской международной конференции "Конверсионные технологии гидроакустики" ГА-94, 18–21 октября 1994.
5. **Сиверс М.А. и др.** Мощные транзисторные устройства повышенной частоты. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. А.с. 195413 СССР. Усилитель мощности класса D/Александров В.А., Сиверс М.А. и др. – Оpubл. 30.11.86, БИ №44.
7. А.с. 1660170 СССР. Ключевое генераторное устройство/Александров В.А., Галахов В.А. и др. – Оpubл. 30.06.91, БИ №24.