Четырехквадрантные усилители

для программно-аппаратного моделирования силового оборудования в реальном времени

Чжоу Вэньвен, Сюэ Цзиньлян, Рен Чжицзюнь, Ли Чжибин, «PONOVO POWER Co.», КНР;
Федор Иванов, ЗАО «ЭнЛАБ», Россия

В последние годы все большее распространение получают работающие в режиме реального времени программно-аппаратные симуляторы [1], например, для испытаний первичного оборудования, обозначаемые в западной литературе аббревиатурой PHIL *(power hardware in loop)*. Программно-аппаратные симуляторы PHIL востребованы при исследованиях и проектировании в следующих областях: генерация и преобразования для традиционных сетей переменного тока 50 и 60 Гц; генерация и распределение электроэнергии в изолированных системах, включая сети 400 Гц; электропривод, электротранспорт и зарядные станции; преобразователи для возобновляемых источников энергии, накопителей и топливных элементов и т.п. [2].

В таких испытательных комплексах одним из важнейших элементов являются специализированные четырехквадрантные усилители мощности, обеспечивающие сопряжение цифровой модели с испытуемым оборудованием. В зависимости от назначения испытуемое оборудование отличается родом тока и уровнем номинального напряжения, но не превышающем, как правило, 1000 В [3, 4]. Отличительной особенностью четырехквадрантных усилителей мощности от обычных (двухквадрантных) является способность не только подавать активную и реактивную мощности на испытуемое оборудование, но и поглощать мощности, формируемые этим оборудованием. То есть способность работать в произвольном, задаваемом симулятором, режиме выдачи тока и напряжения (см. рис. 1) [5].

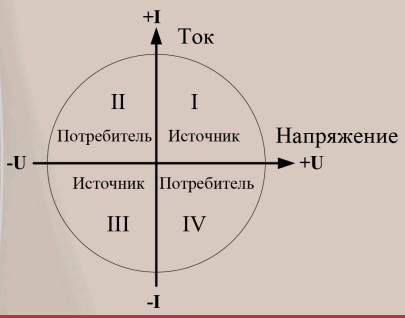


Рис. 1. Четыре квадранта мощности

Структура четырехквадрантного усилителя

На рис. 2 показана структурная схема однофазного четырехквадрантного усилителя мощности, состоящего из основного блока питания, линейного усилителя мощности и модуля мониторинга за системой. Блок питания содержит трехфазные фильтры, изолирующий трансформатор и шестифазный выпрямитель. Усилитель имеет интерфейсы для подключения цифровых и аналоговых сигналов от симулятора, модуль четырехквадрантного линейного усиления, систему измерения выходных значений тока и напряжения и модуля мониторинга функционирования силовой части усилителя. Модуль мониторинга за системой целиком состоит из цифровой системы управления на основе микроконтроллера ARM и имеет ЦАП, коммутатор связи и контроллер ввода-вывода.

Для испытаний силового оборудования обычно необходима трехфазная система питания, и потому требуется использовать три четырехквадрантных усилителя. Структурная схема трехфазного четырехквадрантного усилителя показана на рис. 3. В него входят три составных линейных усилителя мощности, формирующие напряжения фаз Ua, Ub и Uc полностью управляемого трехфазного источника. За работой каждого усилителя можно наблюдать на модуле мониторинга за системой либо на компьютере, подключенном через интерфейс USB или сеть Ethernet. Питание для всех усилителей обеспечивает основной блок питания.

Выходная мощность и мощность рассеивания

Разработанный четырехквадрантный усилитель мощности может выступать не только в роли источника питания, но и в роли регулируемой нагрузки. В режиме источника он может выдавать выходную мощность на нагрузку с индуктивным и емкостным характером. А в режиме рассеивания (абсорбции) он может поглощать энергию от подключенного к нему устройства [6].

Выходная характеристика

На рис. 4 приведен график выходной мощности усилителя в режиме источника. На графике видно, что при коэффициенте мощности нагрузки, равной 0,7 и более, выходная мощность превышает номинальную и для чисто активной нагрузки составляет более 160 %.

Характеристика рассеиваемой мощности усилителя приведена на рис. 5. При номинальном выходном напряжении мощность рассеивания составляет не менее 30 % от номинальной мощности усилителя.

Динамические характеристики усилителя

Определяющим критерием качества усилителя является возможность усиливать входной сигнал с минимальной временной задержкой. Для измерения времени задержки используется генератор сигналов прямоугольной формы с амплитудой 11 В. При этом на выходе усилителя будет формироваться прямоугольный сигнал амплитудой 380 В. Измеренные с помощью осциллографа время нарастания и время спада составляют 6,546 мкс и 6,454 мкс соответственно и приведены на рис. 6 и 7.

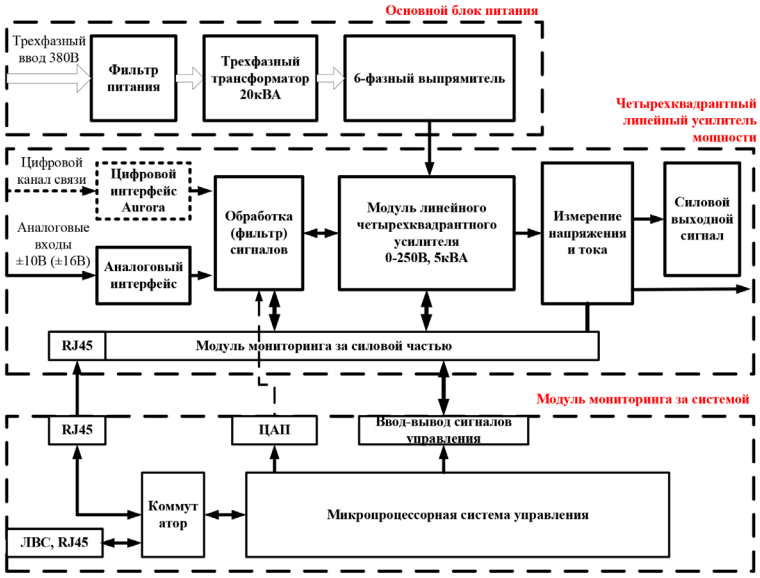


Рис. 2. Структурная схема однофазного четырехквадрантного усилителя мощности

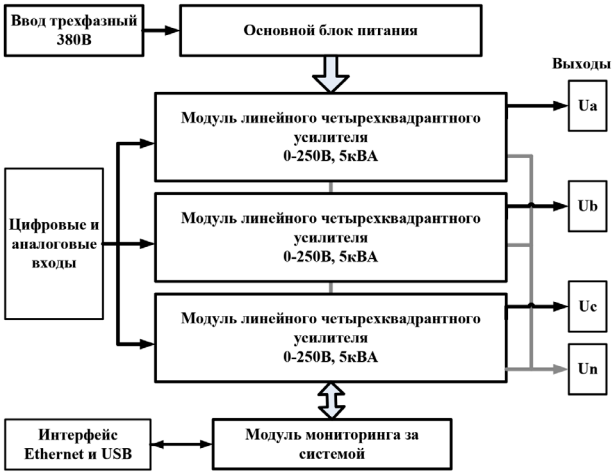


Рис. 3. Структурная схема трехфазного четырехквадрантного усилителя мощности

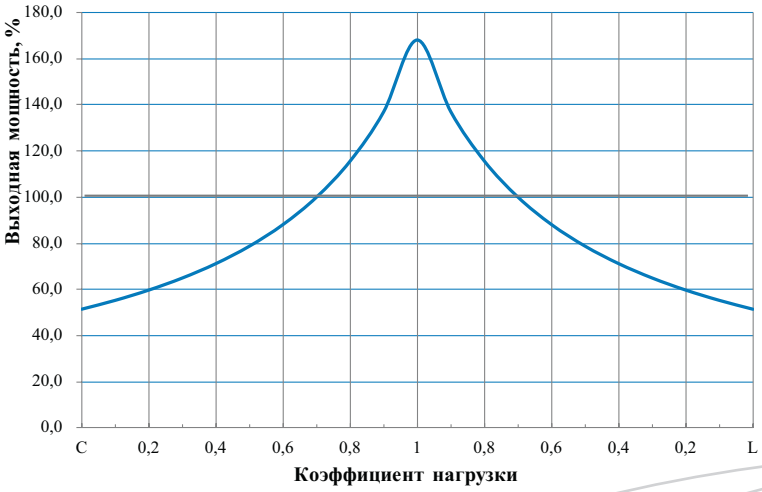


Рис. 4. Характеристика выходной мощности

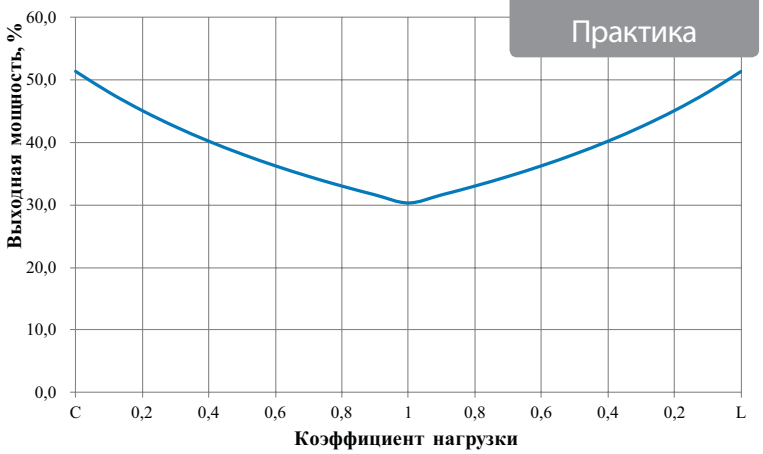


Рис. 5. Характеристика рассеиваемой мощности

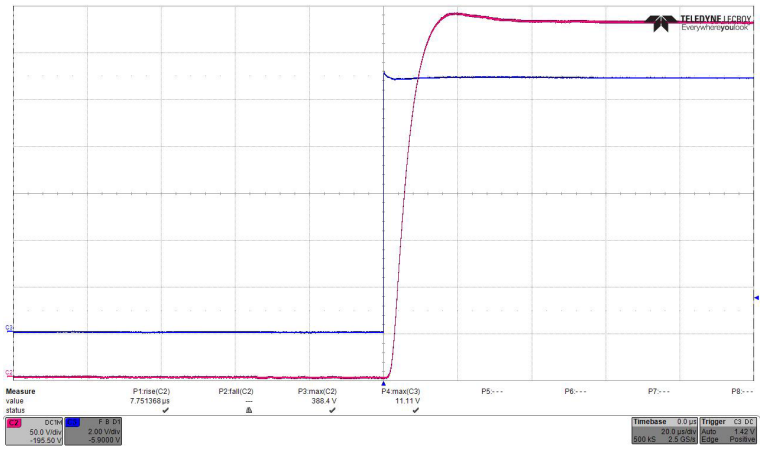


Рис. 6. Осциллограмма выходного (красного) сигнала усилителя при ступенчатом увеличении входного (синего) сигнала

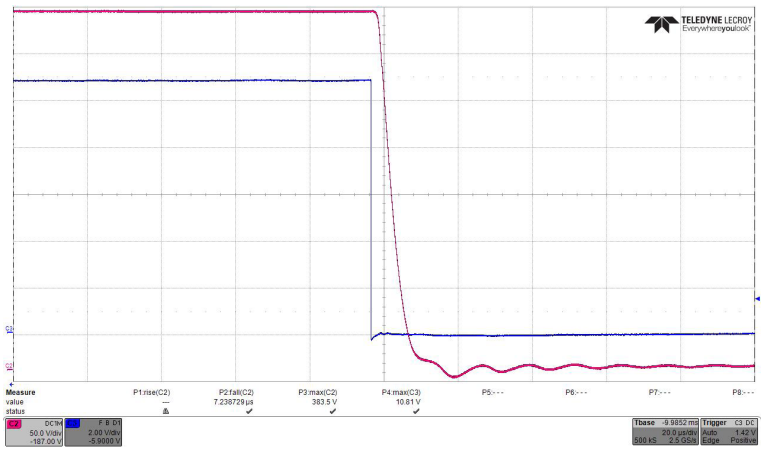
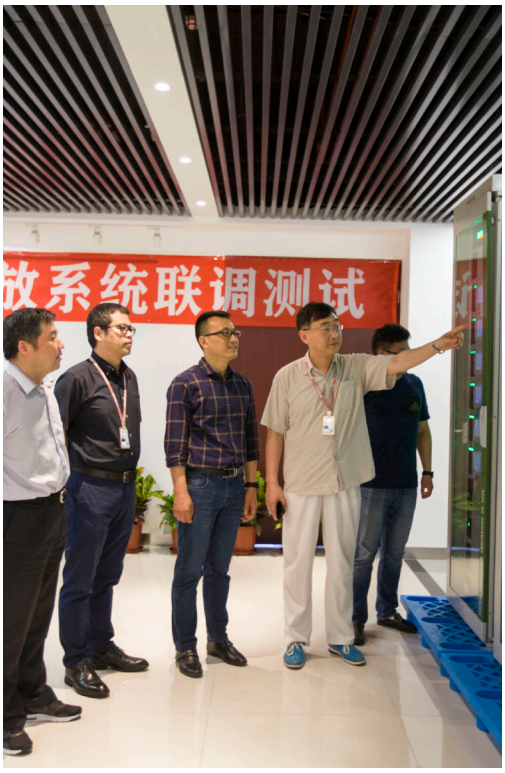


Рис. 7. Осциллограмма выходного (красного) сигнала усилителя при ступенчатом снижении входного (синего) сигнала



Выводы

В статье представлены однофазный и трехфазный четырехквадрантный усилители, имеющие выходную мощность 5 кВА на фазу и спроектированные с высокой степенью интеграции внутренних элементов. Усилители предназначены для подключения к цифровым симуляторам реального времени при проведении моделирования по технологии PHIL. Представлены результаты испытаний, подтверждающие, что четырехквадрантные усилители полностью удовлетворяют требованиям имитационных систем PHIL и имеют необходимые функциональные возможности для проведения испытаний устройств силовой электроники и силового электроэнергетического оборудования. Разработанные усилители являются идеальным оборудованием для физического моделирования различных типов электрооборудования и систем электроснабжения. **ЭS**

Литература

1. Мочалов Д. О., Законьшек Я. В., Шамис М. А. Комплексы моделирования в реальном времени для современных энергосистем // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 1 (10). С. 70–74.
2. Ruuskanen V., Koponen J., Auml T., et al. Design and implementation of a power-hardware-in-loop simulator for water electrolysis emulation // Renewable Energy. 2018. Vol. 119. P. 106–115.
3. Elwakil A., Maundy B., Elamine M. B. and Belostotski L. A four-quadrant current multiplier/divider cell with four transistors // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. Vol. 99. P. 1–1.
4. Pankratov E. L. On optimization of manufacturing of a CMOS power amplifier to increase density of elements with account missmatch induced stress and porosity of materials // International Journal on Organic Electronics (IJOE). 2018. Vol. 7 (1). P. 1–15.
5. Mehboob E., Restrepo M., Canizares C. A., et al. Smart operation of electric vehicles with four-quadrant chargers considering uncertainties // Analog Integrated Circuits & Singal Processing. 2018. Vol. 10. P. 1–7.
6. Aoki I., Kee S. D. and Rutledge D. B. Fully integrated CMOS power amplifier design using the distributed active-transformer architecture // IEEE Journal of Solid-state Circuits. 2002. Vol. 37 (3). P. 371–383.