

# Высокоэффективный источник питания с режимом переключения 100 кВ, 100 кВт для электростатических фильтров (ЭФ)

Алекс Покрываило, Костел Карп и Клифф Скейпелатти

Компания Spellman High Voltage Electronics Corporation

475 Wireless Boulevard Hauppauge, NY 11788

Email: Apokryva@spellmanhv.com

*Материал представлен на 11-й Международной конференции по электростатическим фильтрам, Ханчжоу, 21–24 октября, 2008 г., стр. 284–288*

## КРАТКИЙ ОБЗОР

В течение почти столетия электростатические фильтры (ЭФ) приводились в действие трансформаторными выпрямительными агрегатами, работающими на частоте сети. Последнее десятилетие в отрасли было отмечено все более широким распространением высокочастотных ВВ источников питания (ВВИП), обеспечивающих значительный экономический эффект.

В настоящей статье описывается новая концепция и приводится физическая демонстрация компактного и недорого ВВИП с очень высоким КПД, специально предназначенного для применения с ЭФ и в аналогичных областях. Предлагаемая ключевая технология построена на основе модульного высоковольтного преобразователя с энергодозирующими инверторами, которые работают на частоте выше 50 кГц и продемонстрировали КПД 97,5% в широком диапазоне рабочих условий. Выходные напряжения инверторов сдвинуты по фазе, что обеспечивает исключительно низкие пульсации на уровне 1% и высокую скорость нарастания выходного напряжения 3 кВ/мкс в сочетании с низким накоплением энергии. Модульная конструкция позволяет легко адаптировать ВВИП под конкретные потребности. Вследствие высокой производительности компактность устройства достигается без применения жидкостного охлаждения. Элементы управления обеспечивают стандартные рабочие функции и современные возможности цифровой обработки, наряду с легкостью адаптации под конкретные требования.

В статье подробно описываются конструкция и испытание ВВИП. Формы сигналов тока и напряжения, полученные в ходе эксперимента, указывают на переключение изменяющейся в широких пределах нагрузки в полном диапазоне входных напряжений сети фактически без потерь и полное соответствие с результатами моделирования. Калориметрическое измерение потерь указывает на КПД > 98,5% в высоковольтной части. Полный КПД составляет 95% с полной нагрузкой и более 90% при 20%-ой нагрузке с коэффициентом мощности, как правило, более 93%.

## Ключевые слова

Электростатический фильтр (ЭФ), блоки питания ЭФ, высокочастотные блоки питания, умножитель напряжения.

## ВВЕДЕНИЕ

В течение почти столетия электростатические фильтры (ЭФ) приводились в действие трансформаторными выпрямительными агрегатами, работающими на частоте сети. Последнее десятилетие в отрасли было отмечено все более широким распространением высокочастотных ВВ источников питания (ВВИП), обеспечивающих значительный экономический эффект от их применения благодаря компактности, низкой пульсации, высокому быстродействию и т. д. при повышенной степени улавливания электростатических фильтров. Хорошие обзоры предоставлены в [1], [2]. В этих обзорах отмечается, что лидирующие позиции на рынке занимают компании Alstom и NWL с сотнями введенных в эксплуатацию устройств. Среди других разработок следует отметить работы Applied Plasma Physics [3], Genvolt [4] и VEI [5].

Высокая частота преобразования, обычно 20–25 кГц, позволяет уменьшить размер. Как отмечено в [2], высоковольтный трансформатор компании Alstom SIR весит приблизительно 9,9 кг, что составляет 1/15 от этого веса для источника питания, работающего на частоте 60 Гц. Вес других пассивных элементов также соответственно уменьшился.

Один из главных вопросов надежности — регулирование теплообмена. Эта задача решается с помощью воздушного (NWL) или жидкостного охлаждения (Alstom). Следует отметить, что схемы воздушного охлаждения оказываются более предпочтительными в этой сфере промышленности. Для реализации высокого КПД и во избежание коммутационных потерь в части преобразователя вышеупомянутого ВВИП почти повсеместно используется резонанс напряжений. Теория и практика таких преобразователей хорошо известна [6], [7]. Естественный способ регулирования напряжения/тока, используемый

в таких преобразователях, заключается в регулировании частоты. Акустический шум не представляет собой проблему для ЭФ и подобных применений.

В настоящей статье описывается новая концепция и приводится физическая демонстрация компактного и недорого ВВИП с очень высоким КПД, специально предназначенного для применения с ЭФ и в аналогичных областях.

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

1. Средняя выходная мощность 100 кВт в диапазоне выходного напряжения 90–100 кВ; с ухудшением характеристик при низком напряжении.
2. Высокочастотная составляющая пульсаций 1% обычно при 100 кВ, при полной мощности.
3. Динамическая характеристика: скорость нарастания напряжения 100 кВ/мс мин (от 5 до 95% от предварительно заданного напряжения). Обычно 300 кВ/мс.
4. Накопленная энергия на выходе: < 10 Дж.
5. Частота преобразования 50 кГц.
6. Входное напряжение: три фазы 400 В перем. тока +10%, –14%.
7. Энергетический КПД: как правило, > 95% при полной мощности 100 кВ, > 90% при 20 кВт.
8. Коэффициент мощности: > 93% на полной мощности при 100 кВ, > 75% при 20 кВт.
9. Стойкость к возникновению искры/дуги.
10. Общий вес 250 кг, подлежит определению; высоковольтный блок 109 кг (240 фунтов); объем масла менее 60 л.

## КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

ВВИП построен вокруг модульного высоковольтного конвертера (рис. 1). Питание на все модули конвертера  $M_1 - M_N$  подается с общего входного выпрямителя (ВВ). В состав модулей входит инвертор  $INV_1 - INV_N$ , подающий питание на трансформаторы НВ  $T_1 - T_N$ , которые, в свою очередь, подают питание на умножители напряжения  $R_1 - R_N$ . Эти напряжения суммируются на соответствующих выходах по постоянному току. Такую топологию можно назвать «сумматором индуктивности». Для 100 кВ, 100 кВт номинальный параметр  $N = 4$ . Каждый модуль рассчитан на среднюю мощность 25 кВт и напряжение 25 кВ и должен иметь высоковольтную изоляцию вторичной обмотки трансформатора, рассчитанную на  $3 \times 25 \text{ кВ} = 75 \text{ кВ}$  пост. тока. Эта изоляция должна также выдерживать напряжения переходных процессов, возникающие при включении и выключении ВВИП. Количество таких переходных процессов определяется рабочим сценарием ВВИП и, главным образом, интенсивностью искрения.

Топология, представленная на рис. 1, была давно исследована. Она позволяет уменьшить количество умножительных каскадов и номинальное напряжение высоковольтного трансформатора. Первый фактор улучшает коэффициент уплотнения и коренным образом уменьшает аккумулированную энергию. Сдвиг фаз по напряжению на выходах инверторов приводит к уменьшению пульсаций на выходе и дополнительному уменьшению накапливаемой энергии. При этом методе затраты ресурсов и времени на разработку сокращаются, поскольку после разработки одного модуля (включая его основную изоляцию) вся система реализуется как простая комбинация нужного количества модулей. К издержкам относится большее количество деталей и необходимость высоковольтной изоляции, которая не требуется в традиционных умножителях Cockroft-Walton. Однако эта изоляция подвергается главным образом воздействию напряжений постоянного тока и поэтому изнашивается намного медленнее, чем в случае с напряжением переменного тока.

Ячейки преобразователя размещаются вокруг квазирезонансных энергодозирующих инверторов, выполненных по полумостовой схеме, (рис. 2) [10], [11], [12]. Принципы действия и теория были изложены в [11]. В нормальном режиме один из конденсаторов делителя  $C_{div}$  заряжается до напряжения питания. При замыкании соответствующего переключателя он разряжается через первичную обмотку, в то время как его аналог заряжается до напряжения питания. Если в токовой цепи имеется индуктивность, то формируется сигнал синусоидальной формы, и в идеальном случае вся энергия накопленная в  $C_{div}$ , будет передаваться на сторону вторичной обмотки. Если  $C_{div}$  полностью разряжен, а ток не падает до нуля, то шунтирующие диоды (ШД) ограничивают ток через конденсаторы, предотвращая перемену полярности. Таким образом, остаточная энергия, накопленная в катушке индуктивности, передается на выход (см. рис. 4). Преимущества этой топологии заключаются в жестком управлении передачей энергии, внутреннем ограничении тока короткого замыкания и напряжений на компонентах преобразователя.

Максимальная частота, при которой возможна работа с пересечением точки нулевого тока, в нормализованной форме определяется по уравнению

$$f_N = \frac{1}{\frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{V_l}{V_l - E}\right) + \frac{E}{2V_l} \sqrt{1 - \frac{2V_l}{E}} \right]} \quad (*)$$

где  $E$  — напряжение питания, причем как напряжение питания, так и напряжение нагрузки  $V_l$  относятся к той же самой стороне трансформатора. Частота преобразования  $f$  нормализуется по резонансной частоте  $f_0$  контура, образованного индуктивностью рассеяния и резонансными контурами из трубчатых конденсаторов:  $f_N = f/f_0$ .

Образец графика по этому уравнению показан на рис. 3. Следует заметить, что реальная частота преобразования несколько ниже, чтобы обеспечивать время затухания  $\sim 1,5$  мкс.

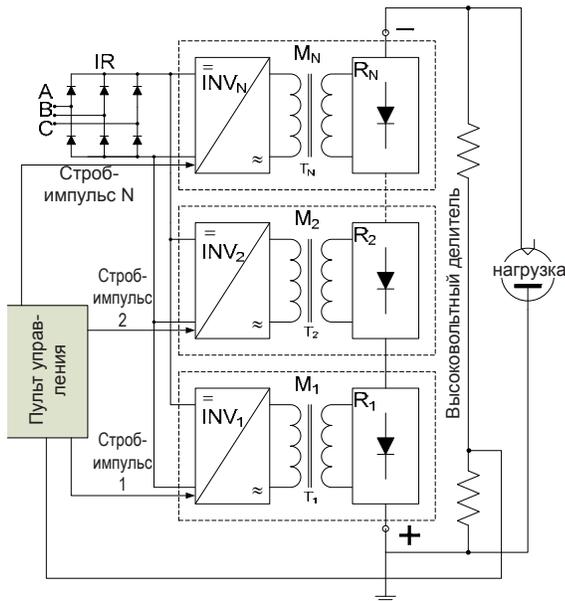


Рис. 1. Блок-схема ВВИП

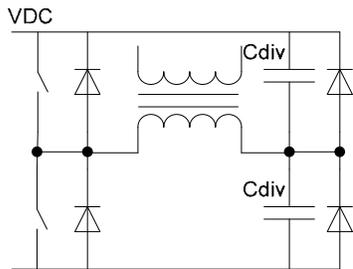


Рис. 2. Инвертор с энергодизирующими конденсаторами

Инверторы работают на частоте приблизительно 50 кГц с полной нагрузкой фактически с нулевыми коммутационными потерями. Индуктивность рассеяния высоковольтных трансформаторов полностью интегрирована в параллельные резонансные контуры. Таким образом, необходимость во внешних катушках индуктивности отпадает. Помимо уменьшения количества деталей и стоимости это свойство очень полезно для выбранной многоэлементной резонансной топологии, поскольку индуктивность рассеяния повторяется от выборки к выборке и не зависит от температуры. Элементы управления обеспечивают стандартные рабочие функции и современные возможности цифровой обработки наряду с легкостью адаптации под конкретные требования. Регулирование выхода осуществляется путем регулирования частоты.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

### Единичный модуль

Типичные формы сигнала, которые показаны на рис. 4 (зафиксированные при номинальном напряжении сети), указывают на хорошее резонансное переключение без сквозных токов во всем диапазоне входных напряжений сети, и полное соответствие с результатами имитационного моделирования PSpice. Первичная обмотка была разделена на две секции, подключенные параллельно. Причем каждая секция коммутировала группу транзисторов. Отсюда происходит обозначение halved («разделенная пополам») в заголовке рисунка. Пунктирной линией показано начало проводимости на шунтирующем диоде. При низком напряжении в линии шунтирующие диоды не проводят ток, и преобразователь работает в граничном режиме, который задается (\*). Эти измерения были проведены с помощью БТИЗ CM300DC-24NFM компании Powerex. Потери мощности были оценены при 50 Вт на транзистор (четыре транзистора, или 800 Вт на модуль преобразователя), а теплота легко отводилась с помощью радиаторов воздушного охлаждения с превышением температуры относительно окружающей среды менее чем на 40 °С. Методы измерения потерь мощности описываются в [13].

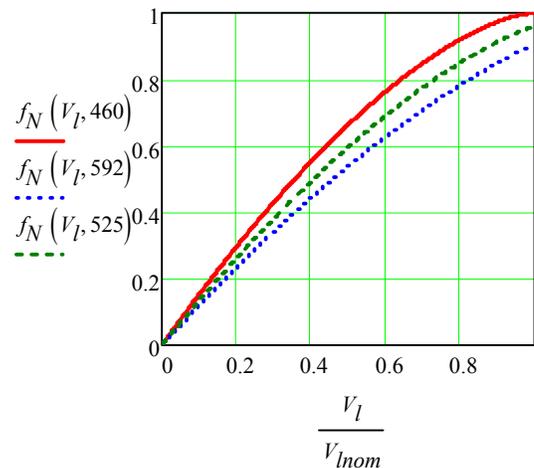


Рис. 3. Кривые ZCC (с пересечением точки нулевого тока) для низкого (460 В), высокого (592 В) и номинального (525 В) напряжения питания постоянного тока.  $V_{Inom}$  — номинальное напряжение на нагрузке

Особое внимание уделялось определению потерь на высоковольтном трансформаторе и умножителе. Этот фактор учитывался как ключевой при разработке высоковольтного бака. С этой целью были проведены calorиметрические измерения потерь. В результате были получены данные по потерям — 344 Вт, из них 175 Вт приходится на потери на трансформаторе, а остальная часть — потери на умножителе. Таким образом, ожидалось, что КПД высоковольтной части составит  $> 98,5\%$ .

С учетом потерь на инверторе КПД преобразователя оценивался на уровне 97,5%, а полный КПД по всему ВВИП прогнозировался на уровне 95%. Ввиду ожидаемой высокой производительности было решено использовать воздушную схему охлаждения.

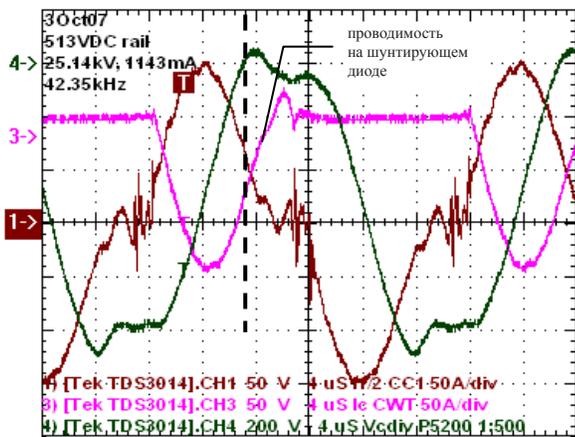


Рис. 4. Номинальное напряжение сети.  $P = 28,7$  кВт; кривая 1 — первичная обмотка тока (половинное значение); кривая 3 — ток коллектора (половинное значение); кривая 4 — напряжение на резонансном контуре из трубчатых конденсаторов. Проводимость на шунтирующем диоде справа от прерывистой линии



Рис. 5. Лабораторный ВВИП

### Испытания ВВИП

Лабораторный ВВИП был собран на тележке, как показано на рис. 5. Он состоит из трех основных блоков: линейный выпрямитель, защищенный автоматическим выключателем; секция инвертора и заполненный маслом высоковольтный бак. Следует отметить, что в этой работе основное внимание уделялось преобразователю; линейный выпрямитель не был оптимизирован.

ВВИП прошел многочисленные испытания с использованием активных нагрузок. На рис. 6 и 7 показаны типичные токи на первичных обмотках (половинные значения) со сдвигом по фазе для мощности 50 кВт и 100 кВт соответственно. Колебания после основного выброса тока генерируются резонансом между индуктивностью рассеяния и паразитной емкостью трансформаторов. Обратите внимание на отсутствие импульсной характеристики тока «обратный выброс импульса» для параллельно подключенных резонансных схем при небольшой нагрузке.

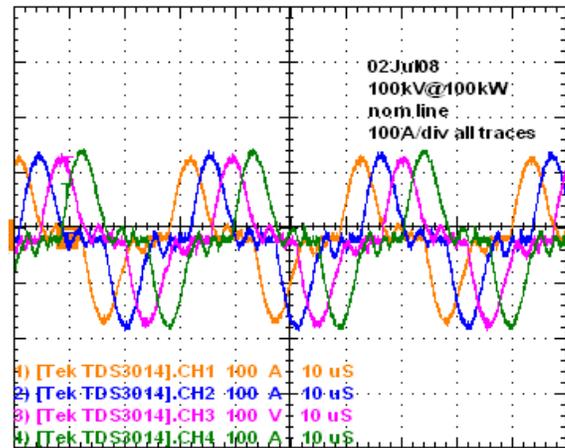


Рис. 6. Токи первичной обмотки (половинное значение) со смещением фаз  $\pi/4$  при 100 кВ и 100 кВт. Номинальное напряжение сети — 400 В перем. тока

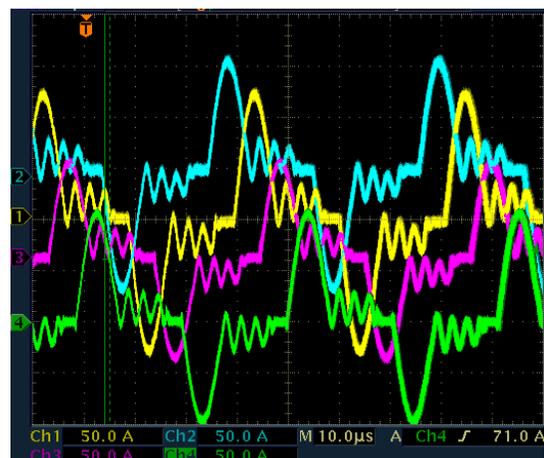


Рис. 7. То же самое, что и на рис. 6 при 100 кВ и 50 кВт. Низкое напряжение в линии 400 В перем. тока — 14% (345 В перем. тока)

Поскольку здесь используется схема двухполупериодного выпрямления, сдвиг фаз составляет  $\pi/4$ . По расчетам PSpice, пульсация с полной амплитудой (p-p) в худшем случае с высоким напряжением в линии составит 0,223% выходного напряжения с емкостью ударной нагрузки ВВИП  $< 2$  нФ (рис. 8). Измеренная пульсация примерно в четыре раза выше и имеет более низкую по частоте основную составляющую

(рис. 9), что может быть следствием асимметрии стро-  
бирующих сигналов, неравных паразитных емкостей,  
разбросом данных обмотки и т. д. Подобный эффект  
наблюдался в [9]. В ходе этих модельных экспери-  
ментов было определено также значение коэффициента  
мощности (PF), равное 0,943, что близко к экспери-  
ментальным результатам.

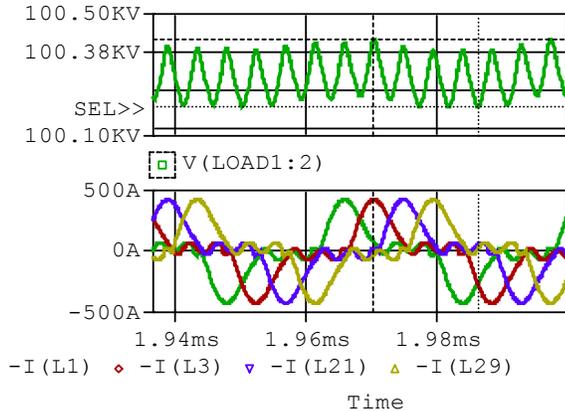


Рис. 8. Моделирование схемы ВВИП. Верхняя линия 580 В.  
Пульсация 0,223 % полной амплитуды. Коэфф.  
мощности PF = 0,943. Экспериментальное  
значение PF = 0,946 (см. рис. 11)

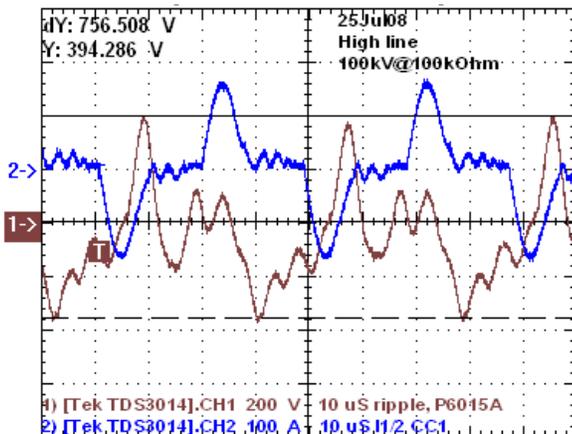


Рис. 9. Пульсация при 100 кВ на нагрузке 100 кОм  
составляет 0,762 % полной амплитуды

Динамическая характеристика ВВИП отличается ис-  
ключительно высоким быстродействием: время нарастания  
от нуля до полного выходного напряжения, как  
правило, менее 250 мкс (рис. 10) в зависимости от на-  
пряжения в линии. Динамические характеристики могут  
быть проанализированы с большой точностью, ис-  
пользуя следующее уравнение:

$$V_f(t) := 2 \cdot V_{rail} \sqrt{\frac{C_{div}}{C_s} \cdot f \cdot t}$$

где все переменные и параметры приводятся к одной  
и той же стороне трансформатора;  $C_s$  — полная емкость

умножителя модуля. При изменении частоты во время  
заряда имитационные модели PSpice обеспечивают на-  
много более высокую точность.

Высокое быстродействие полезно не только для ЭФ,  
но также и для медицинских применений. Необходимо  
отметить, что время нарастания фактически не зависит  
от нагрузки, поскольку ток нагрузки на порядок мень-  
ше, чем ток, заряжающий конденсаторы умножителя.

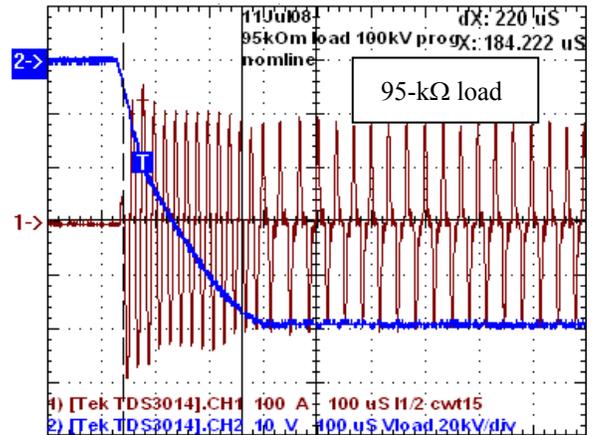


Рис. 10. Время нарастания напряжения на нагрузке 95 кОм  
при номинальном напряжении сети. Кривая 2 —  
напряжение нагрузки, 20 кВ/деление; кривая 1 — ток  
первичной обмотки (половинное значение), 100 А/деление

На рис. 11 представлены экспериментальные данные  
по измерению мощности, полученные при номиналь-  
ном напряжении сети. В соответствии с имитацион-  
ными моделями и информацией, полученной на осно-  
вании работы с единственным модулем, полный КПД  
составляет 95 % при полной нагрузке и более 90 % при  
20%-й нагрузке. Коэффициент мощности был также  
удовлетворительно высоким (сравните с имитацион-  
ной моделью на рис. 8). При высоком и низком нап-  
ряжении сети измерения показали очень близкие резуль-  
таты. При нагрузке с более высоким сопротивлением  
КПД и коэффициент мощности (PF) также оставались  
высокими (рис. 12).

Во время написания настоящей статьи были выпол-  
нены длительные прогоны при 100 кВ с мощностью  
до уровня 75 кВт. Испытания при полной мощности  
были ограничены ~40 мин. Они продемонстрировали  
умеренный перегрев основных компонентов ВВИП.  
Для номинального напряжения сети результаты пред-  
ставлены в итоговой таблице 1.

Таблица 1. Перегрев основных компонентов ВВИП, °С

Мощность на нагрузке, кВт	Основание транзистора	Основание шунтирующего диода	Высоковольтный бак
75	20	18	27
100	25	23	не используется

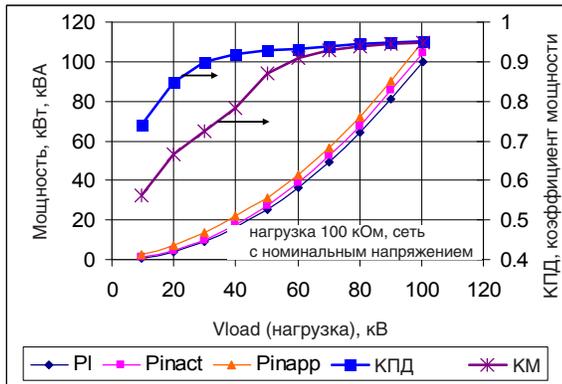


Рис. 11. Кажущиеся значения  $P_{inapp}$  и активная входная мощность  $P_{inact}$ , мощность, поглощаемая нагрузкой,  $P_i$ , КПД и коэффициент мощности (PF) при номинальном напряжении для нагрузки 100 кОм

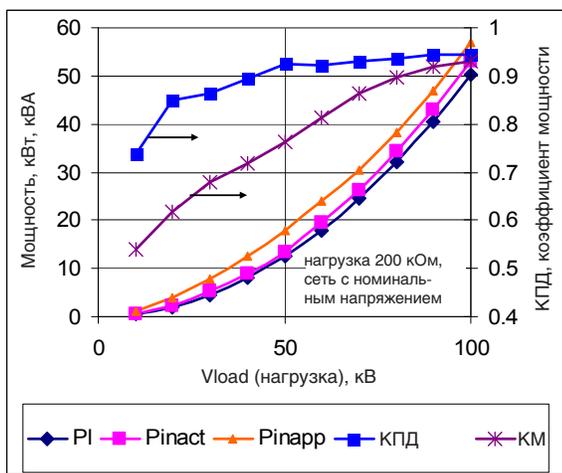


Рис. 12. То же самое, что и на рис. 11 для нагрузки 200 кОм

## ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы благодарят своих коллег из компании Spellman High Voltage Electronics Corporation за широкую поддержку при проведении этой работы и особенно г-на А. Липовича за его вклад при разработке механической конструкции и г-на А. Сильверберга за реализацию алгоритма фазового сдвига.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. K. Parker, 'Electrical Operation of Electrostatic Precipitators', IEE, London, 2003, 270pp.
2. Advanced Electrostatic Precipitator (ESP) Power Supplies Update: The State-of-the-Art of High-Frequency Power Supplies. EPRI, Palo Alto, CA: 2006. 1010361.
3. <http://www.appliedplasma.com/>
4. <http://www.genvolt.co.uk/index.php?page=allproducts&sec=12>
5. <http://www.vei.ru/products/zpp/zpp.htm>
6. M. K. Kazimierczuk, D. Czarkowski, "Resonant Power Converters", Wiley, NY, 1995.
7. R. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics" (Second Edition), Springer, NY, 2001, 912pp.
8. US Patent 4,137,039, "X-Ray Diagnostic Generator", Feb. 23, 1982.
9. Yu. Petrov and A. Pokryvailo, "HV DC-to-DC Converter", Pribory i Tekhnika Experimenta, v.2, pp. 141–143, 1986, Translation to English Plenum Publishing Corp.
10. B. D. Bedford and R.G. Hoft, 'Principles of Inverter Circuits', Wiley, NY, 1964.
11. B. Kurchik, A. Pokryvailo and A. Schwarz, "HV Converter for Capacitor Charging", Pribory i Tekhnika Experimenta, No. 4, pp. 121–124, 1990, Translation to English Plenum Publishing Corp.
12. M. Wolf and A. Pokryvailo, "High Voltage Resonant Modular Capacitor Charger Systems with Energy Dosage", Proc. 15th IEEE Int. Conf. on Pulsed Power, Monterey CA, 13–17 June, 2005, pp. 1029–1032.
13. A. Pokryvailo and C. Carp, "Accurate Measurement of on-State Losses of Power Semiconductors", 28th Int. Power Modulators Symp., Las Vegas, 27–31 May, 2008.