

# Проектирование и испытание импульсной нагрузки высокой мощности

Алекс Покрывайло, Костел Карп и Клифф Скейпелатти  
Компания Spellman High Voltage Electronics Corporation

Представлено на 28-м Международном симпозиуме по силовым модуляторам  
(28th Int. Power Modulators Symp.), Лас-Вегас, 27–31 мая, 2008 г., стр. 181–184

**Краткий обзор:** В настоящей статье описывается конструкция и испытание двухканальной импульсной нагрузки мощностью 52 кВт. К числу основных характеристик таких нагрузок относится исключительно низкая паразитная индуктивность, порядка 200 нГн. Такая низкая индуктивность была необходима из-за высоковольтного тока с микросекундной длительностью импульсов, ее удалось достичь благодаря компактной конструкции и тщательно проработанной компоновке. Небольшой размер — предварительное условие для минимизации индуктивности; он был достигнут за счет принудительного жидкостного охлаждения. Неиндуктивные объемные резисторы использовались при таких значениях мощности, которые значительно превосходили их подробные технические характеристики для работы на воздухе, но они успешно справились с возложенной на них задачей. Они размещались в стандартных барабанах из нержавеющей стали. Вода для охлаждения (смесь воды и пропилен-гликоля) циркулировала через теплообменник.

В статье подробно описываются различные аспекты указанной конструкции, в том числе: выбор сопротивлений, расчет индуктивности нагрузки, выбор шин, детали кинематической схемы, теплопередача, высокое напряжение, безопасность, а также параметры хладагента и т. д. Особое внимание уделялось тому, как избежать турбулентного потока, который мог бы привести к растрескиванию резистора. Измерения индуктивности продемонстрировали результаты, близкие к расчетным. Испытание при большой мощности показало надежность работы с перегревом приблизительно на 40 К выше окружающей среды.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В различных областях с применением высоковольтных источников, например испытательных системах проверки заряда конденсаторов, наносекундных и пикосекундных генераторах импульсов и т. д., широко используются импульсные резистивные эквиваленты нагрузок. К таким нагрузкам предъявляются особые требования, которые отличают их от более традиционных нагрузок постоянного или переменного тока. Одно из самых жестких требований заключается в обеспечении низкой паразитной индуктивности. Она должна иметь порядок нескольких сотен наногенри, а при работе с микросекундными и наносекундными импульсами — порядка десятков наногенри, соответственно. Обычно паразитную индуктивность сводят к минимуму благодаря использованию низкоиндуктивных схем, предпочтительнее всего коаксиальных, а также минимизации общего размера нагрузки. При высокой средней мощности и высоком напряжении последнее условие трудно выполнимо без эффективного охлаждения и соблюдения требуемых изоляционных зазоров. Дополнительное типичное требование — это хорошая длительная стабильность сопротивления. В связи с этим, в сущности, исключается использование различных водных растворов, таких как водные растворы медного купороса.

В настоящей статье описывается конструкция и испытание двухканальной нагрузки мощностью 52 кВт, используемой при разработке зарядного устройства конденсатора с высокой частотой повторения импульсов.

## II. КОНСТРУКЦИЯ

### A. Технические характеристики

Нагрузка была разработана с учетом следующих спецификаций:

1. Аккумулирующая способность  $C = 5,3$  мкФ (на канал)
2. Максимальное напряжение зарядки:  $V_{ch} = 1200$  В
3. Максимальная средняя мощность  $P_{av} = 52$  кВт (26 кВт на канал)
4. Ширина импульса:  $t_{pulse} \approx 5$  мкс
5. Макс. частота следования импульсов (PRF): 60 кГц
6. Индуктивность нагрузки:  
(на канал, за исключением выводов)  $L_{load} \approx 0,2$  мкГн
7. Перемена полярности  
(при максимальной напряжении зарядки):  
- в нормальном рабочем режиме 200 В  
- при аномальной эксплуатации 600 В
8. Возможность перенастройки для работы с импульсным напряжением в несколько десятков кВ

### B. Аспекты построения схемы — выбор сопротивления

Испытательная схема может быть представлена в виде схемы разряда конденсатора на  $r, L$  схемы, где  $r, L$  — нагрузочное сопротивление и индуктивность соответственно (рис. 1). В последнюю входит индуктивность выводов.

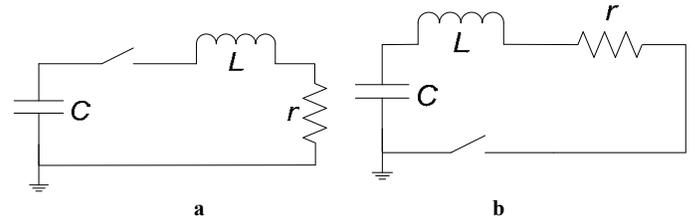


Рис. 1. Эквивалентная схема для определения сопротивления нагрузки и индуктивности

При нулевых начальных условиях, в системе обозначений Магкэд, ток нагрузки « $i$ » и напряжение конденсатора « $v$ » задаются формулами:

$$i(t, L, r) := \frac{V_0}{L(\alpha_1(L, r) - \alpha_2(L, r))} \cdot (\exp(\alpha_1(L, r) \cdot t) - \exp(\alpha_2(L, r) \cdot t))$$

$$v(t, L, r) := -\frac{V_0}{(\alpha_1(L, r) - \alpha_2(L, r))} \cdot (\alpha_2(L, r) \cdot \exp(\alpha_1(L, r) \cdot t) - \alpha_1(L, r) \cdot \exp(\alpha_2(L, r) \cdot t))$$

где

$$\alpha_1(L, r) := \frac{-r}{2L} + \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{L \cdot C}} \quad \alpha_2(L, r) := \frac{-r}{2L} - \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{L \cdot C}}$$

При индуктивности заданного контура  $L = 1,5 \text{ мкГн}$  перемена полярности приблизительно 200 В и pulse  $\approx 5 \text{ мкс}$  реализуются с помощью сопротивления нагрузки  $r = 0,6 \text{ Ом}$  (рис. 2). Перемена полярности в  $\approx 600 \text{ В}$  может быть обеспечена путем повышения индуктивности выводов до 10 мкГн или путем уменьшения  $r$  до 0,25 Ом. На рис. 3 демонстрируются формы кривой напряжения на конденсаторе для безындуктивного разряда ( $L = 0,2 \text{ мкГн}$ ) и искусственно увеличенной индуктивности  $L = 10 \text{ мкГн}$ .

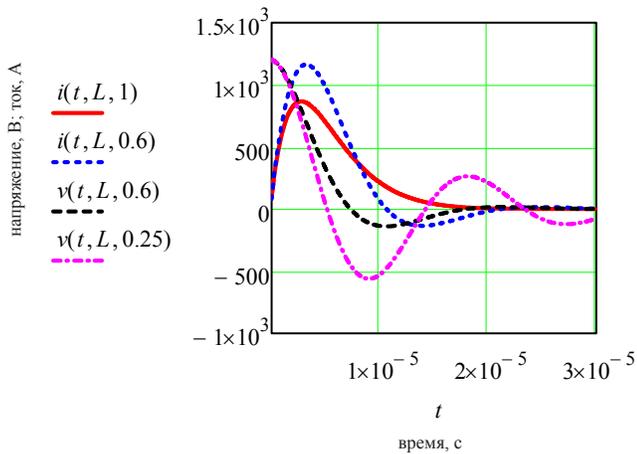


Рис. 2. Формы волны тока и напряжения для  $L = 1,5 \text{ мкГн}$ ; значения «г» (в СИ), как указано в легендах для переменных.  $r = 1 \text{ Ом}$  соответствует критическому затухающему разряду

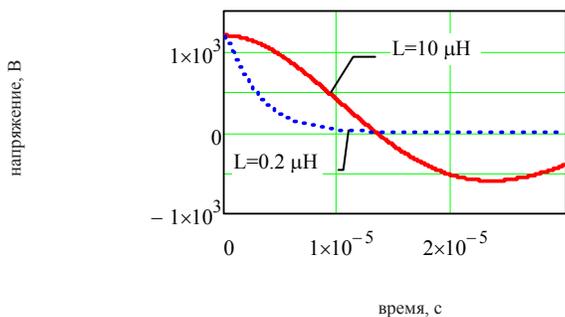


Рис. 3. Формы волны тока и напряжения для  $r = 0,6 \text{ Ом}$

Подбор необходимого сопротивления и изменение конфигурации нагрузки удобно выполнять, используя относительно большое количество постоянных резисторов. Их выбор имеет первостепенное значение и влияет на габаритный размер, стоимость и надежность. Ввиду низкой индуктивности конструкции были выбраны объемные керамические резисторы. Они эффективно работали в наносекундных системах с принудительным масляным охлаждением [1], что позволило добиться небольшого размера и, следовательно, низкой индуктивности. Плоские сопротивления производства компании Kanthal Globar серии 510SP относительно недороги, компактны и просты в установке. Самые крупные детали предназначены для максимального рассеяния мощности в 150 Вт на воздухе; при масляном охлаждении, на основе предшествующего опыта, мы ожидали получить хороший запас надежности при нагрузке в 500 Вт. Непродолжительное испытание резисторов 887SP в ванне с трансформаторным маслом показало, что они способны выдерживать нагрузку в 500–1000 Вт без чрезмерного напряжения конструкции. Главная опасность, согласно указаниям изготовителя, заключается в доведении охлаждающего агента до точки кипения, что приводит к растрескиванию керамики. Таким образом, важно избежать турбулентного потока, чтобы уменьшить температурные перепады на границе раздела.

И, наконец, были выбраны резисторы  $6,3 \text{ Ом} \pm 20\%$ . С 48 резисторами на канал ( $\sim 500 \text{ Вт}$  на резистор) соединения выглядят так, как показано на рис. 4. Номинальное сопротивление составляет  $0,525 \text{ Ом}$ , а измеренное значение близко к  $0,6 \text{ Ом}$ . Нагрузка может быть реконфигурирована до  $2,4 \text{ Ом}$ ,  $1,2 \text{ Ом}$  или  $0,3 \text{ Ом}$  без существенных изменений.

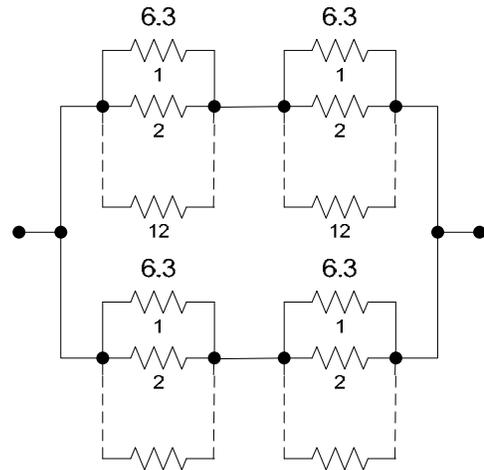


Рис. 4. Электрические соединения (на канал)

### С. Механическая схема

Индуктивность нагрузки  $L_{load}$  определяется суммой индуктивности резисторов, а также индуктивности вспомогательных и основных шин. Эквивалентная схема (поясняющая также геометрическое расположение и паразитные сопротивления) показана на рис. 5. Согласно этой схеме, индуктивность  $L_{load}$  может быть вычислена как

$$L_{load} = \frac{(L_R + L_{aub})}{2} + L_{mb},$$

где  $L_R$  — индуктивность группы резисторов 12, а  $L_{aub}$ ,  $L_{mb}$  — индуктивности вспомогательной и основной шины соответственно.

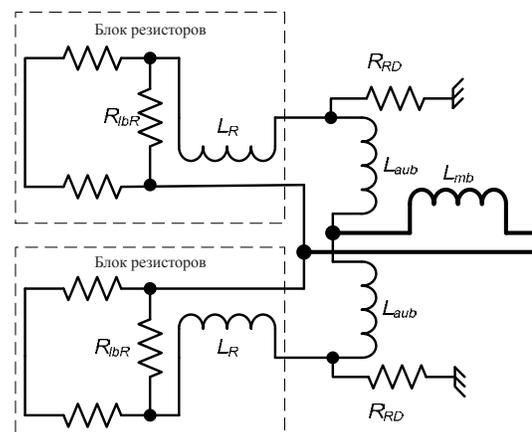


Рис. 5. Эквивалентная схема резистивной нагрузки с учетом паразитной индуктивности и проводимости охлаждающего средства

Уменьшение объема, занимаемого магнитным полем, определяет ключевое условие для достижения низкой индуктивности. С учетом этого сопротивления были подключены параллельно по 12 единиц в группе в одной плоскости, обратная цепь обеспечивалась другой группой из 12 единиц (см. фотографию на рис. 6). Расчет индуктивности при таком расположении элементов может

быть выполнен для аппроксимации с плоской шиной при помощи следующей формулы [2]:

$$L_{\text{ш}} := \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{d}{b+c} \right) + \frac{3}{2} + f - \varepsilon \right)$$

где  $\mu_0$  — диэлектрическая проницаемость свободного пространства,  $d$  — среднее расстояние между шинами,  $b$ ,  $c$  — толщина и ширина шины соответственно,  $f$ ,  $\varepsilon$  — табличные значения. Для группы резисторов  $d = 0,06$  м;  $b = 0,02$  м;  $c = 0,3$  м;  $f = 0,8$ ;  $\varepsilon = 0,002$ ; что дает в результате  $L = 2,5 \times 10^{-7}$  Гн/м или  $LR = 7,5 \times 10^{-8}$  Гн для группы резисторов длиной  $\sim 0,3$  м. Этот расчет был также подвержен анализу по методу конечных элементов. Поскольку имеется две группы сопротивлений, подключенных параллельно, их индуктивность делится на два (см. эквивалентную схему на рис. 5). Индуктивность вспомогательной и основной шины  $L_{\text{aub}}$  и  $L_{\text{mb}}$  добавляют  $\sim 100$  нГн, таким образом ожидается, что полная индуктивность нагрузки не превысит 200–300 нГн. Фактическая измеренная величина составила  $L = 200$  нГн (измеритель иммитанса Quadtech 1920, измерение проводилось при частоте 10 кГц).

Блок резисторов входит в стандартный барабан из нержавеющей стали объемом 75,7 л (рис. 6) и поддерживается главными шинами на крышке из лексана, которая используется так же как проходной изолятор.

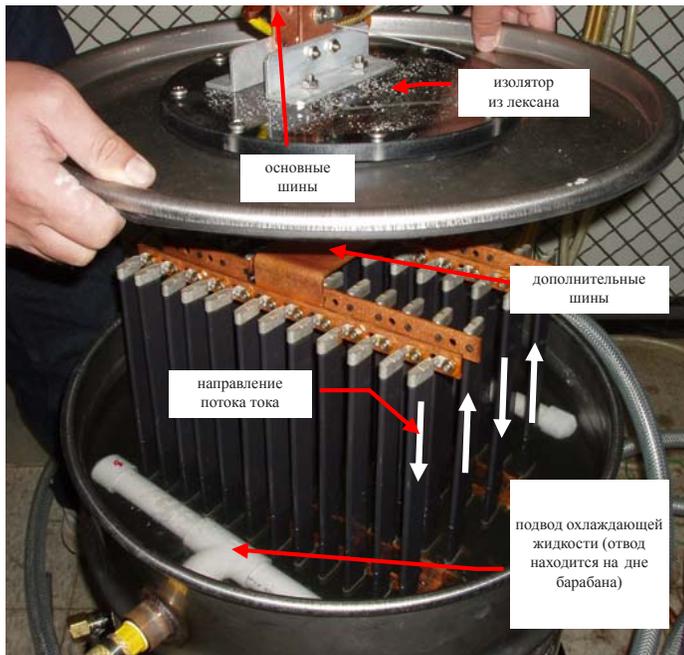


Рис. 6. Резистивная нагрузка погружается в охладитель (один канал). Нагрузка полностью изолирована от барабана

#### D. Кинематическая схема

Система работает в замкнутом цикле. Под действием насоса хладагент циркулирует по двум бакам с нагрузкой и отдает тепло через теплоотвод, который оснащен вентилятором (рис. 7). Поток контролируется расходомерами, расход можно грубо регулировать клапанами, которые установлены в барабанах. Система шлангов выполнена симметрично относительно нагрузок; конструкцией не предусмотрены никакие другие специальные меры по балансировке нагрузки. Перегрев, который может произойти при отказе насоса, засорении каналов и т. д., предотвращается посредством блокировки с помощью термовыключателей, контролирующих температуру в барабанах.

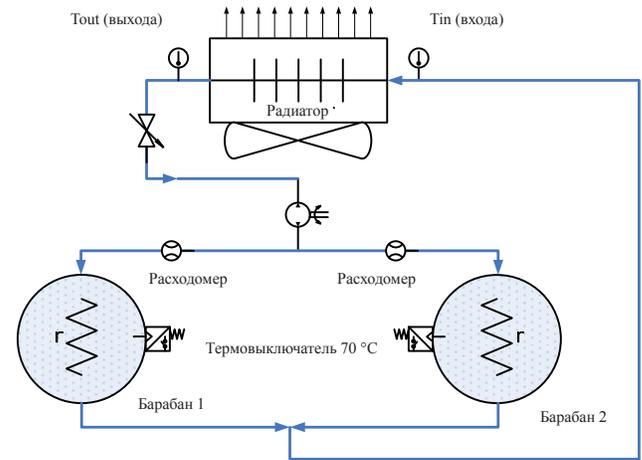


Рис. 7. Кинематическая схема системы охлаждения

#### E. Охлаждающий агент

Изоляционные жидкости, такие как трансформаторное или силиконовое масло, обладают хорошими диэлектрическими и охлаждающими свойствами и, таким образом, идеально подходят для наших целей. Требуемый расход может быть рассчитан по следующей формуле,

$$m = \frac{P}{c_p \Delta T},$$

где  $P$  — рассеиваемая мощность,  $P = 52$  кВт = 44 604 ккал/ч,  $c_p$  — теплоемкость, или удельная теплоемкость при постоянном давлении, и  $\Delta T$  — требуемая разность температур. Предполагая, что между барабаном и выходом теплообменника  $\Delta T = 50$  °C мы вычисляем массовый расход  $Q_m$  на канал для масла с  $c_p = 2$  кДж/кгК  $Q_m \approx 0,5$  кг/с или объемный расход  $Q_v \approx 30$  л/мин. ( $\approx 8$  гал/мин). Такой расход можно легко обеспечить обычными насосами. Однако проблема с использованием масла заключается в низкой безопасности, связанной с его воспламеняемостью и риском утечки. Поэтому, несмотря на сомнения относительно электрической прочности и коррозии, мы предпочли этиленгликоль (EG), пропиленгликоль (PG) и их водные смеси, широко используемые как антифризы. Деионизированная вода была отвергнута ввиду предполагаемой коррозии и потери диэлектрических свойств при длительном использовании.

Этиленгликоль и его водные растворы использовались в областях с импульсными источниками питания (см., например [3], [4]) главным образом благодаря большой диэлектрической проницаемости ( $\approx 40$  для этиленгликоля). Для того, чтобы выдерживать длительные импульсы (несколько микросекунд и более), вода должна быть чистой, а раствор — охлажденным.

Данные по удельному сопротивлению этиленгликоля и пропиленгликоля, и особенно их растворов, трудно найти в справочной литературе. Единственная авторитетная ссылка на это свойство была найдена в [5]. Некоторая дополнительная информация содержится в [6]. Согласно [5], удельное сопротивление этиленгликоля составляет  $\gamma \approx 104$  Ом·м при 20 °C. Для оценки этого параметра было проведено экспресс-испытание. Два плоских электрода с площадью 7 см<sup>2</sup>, расположенные на расстоянии 0,5 мм, были погружены в жидкость. Хладагент на базе этиленгликоля компании Prestone (предположительно 97%-й этиленгликоль) имел  $\gamma \approx 140$  Ом·м при комнатной температуре и при напряжении постоянного тока 10 В. Деионизированная вода имела  $\gamma \approx 0,7 \times 10^4$  Ом·м при 200 В. Таким образом, предполагалось, что удельное сопротивление раствора будет не менее удельного сопротивления этиленгликоля. Как

ни странно, измеренные значения можно считать благоприятными в свете экспериментальных данных [7], согласно которым максимальная диэлектрическая прочность для электролитов в квазиродных полях при использовании длинных «косых» импульсов при  $r \approx 2 \div 3,5 \times 10^2$  Ом·м.

Очевидно, что окружающая жидкость играет роль шунта для сопротивлений нагрузки. Для описанной конфигурации сопротивление шунтирующего хладагента (см. рис. 5) можно оценить в 10 Ом при комнатной температуре, что значительно больше, чем сопротивление блока резисторов. Повышение температуры может в сильной степени уменьшить это значение приблизительно на  $20 \div 30$  К, как следует из [3], [4].

При анализе возможных подключений нагрузки (рис. 1), было отмечено, что вариант б, когда нагрузка связана с «землей», предпочтительнее, чем вариант с подачей напряжения только к хладагенту во время разряда конденсатора, вследствие чего хладагент подвергается стрессовой нагрузке в течение лишь нескольких мс. Тогда паразитный ток течет между блоками резисторов (сопротивления RlbR), между резисторами и барабаном (сопротивления RRD) — см. рис. 5. В варианте а напряжение постоянно присутствует в хладагенте во время заряда, когда электрический ток проходит через RRD, и пока конденсатор не разрядится.

Следует отметить, что в настоящем исполнении мы уделяли больше внимания стабильности сопротивления, а не диэлектрической прочности: изоляционные промежутки составляют несколько сантиметров и достаточны, чтобы выдержать, вероятно, сотни киловольт длительностью в несколько микросекунд. У нас нет достаточной информации относительно диэлектрических свойств водных растворов гликоля при более длительных импульсах. Однако мы в состоянии сделать некоторые полезные предварительные расчеты. Рассеяние мощности в жидкости составит

$$P = \frac{V_{ch}^2}{R_{liq}}$$

или 1 МВт при  $V_{ch} = 1200$  В и  $R_{liq} = 1,44$  Ом (см. результаты испытаний ниже). При непрерывной подаче такая мощность привела бы к кипению раствора, что можно рассматривать как пробой при длительных импульсах. Таким образом, время до пробоя может рассчитаться как

$$\tau_{brd} = \frac{c_p m \Delta T}{P}$$

предполагая, что это адиабатический нагрев при постоянном  $R_{liq}$ . Для массы жидкости  $m = 70$  кг,  $\Delta T = 50$  К,  $c_p = 3,56$  кДж/кг·К мы рассчитываем результат = 12 с. Такая ситуация, хотя она и является чисто гипотетической ввиду необходимости подвода чрезвычайно большого количества мощности для поддержания накопительного конденсатора в заряженном состоянии, предостерегает против соединения, показанного на рис. 1а.

Этиленгликоль очень ядовит. Поэтому в конечном счете в качестве хладагента был выбран пропиленгликоль компании Prestone, разбавленный деионизированной водой в соотношении 50 на 50%. Удельная теплоемкость пропиленгликоля 2,51 кДж/кг·К близка к удельной теплоемкости этиленгликоля (2,41 кДж/кг·К) [8], а в водных растворах 50 на 50%  $c_p = 3,56$  кДж/кг·К, что составляет приблизительно 85% удельной теплоемкости воды. Таким образом, расход может быть значительно ниже, чем для циркуляции масла.

### 3. Результаты проверки

Длительная работа на полной мощности 52 кВт продемонстрировала, что температура барабанов (измеренная в средней секции с использованием термопар) составила 60–70 °С (в зависимости от температуры окружающей среды и положения теплообменника) при расходе 20 л/мин. Температура окружающей среды в испытательном отсеке поддерживалась холодильной установкой на уровне 23 °С, хотя температура вокруг барабанов была значительно

выше. Никаких признаков разрушения резисторов кроме ржавчины на стальных лапках замечено не было; однако хладагент стал непрозрачным и слизистым, а шины также были покрыты шламом. Сопротивление хладагента, измеренное при высоком токе до 3 А с использованием источника питания постоянного тока, изменялось от 9 Ом при 11 °С (свежий раствор, сохраняемый в барабане приблизительно в течение месяца) до 2,8 Ом при 18 °С (выдержанный раствор) и до 1,2 Ом при 54 °С (выдержанный раствор). Это соответствует наблюдаемому увеличению тока на ~10% в горячих условиях (67 °С) по сравнению с работой при низкой температуре (23 °С — см. рис. 8).

Коррозия под действием внешнего тока, которой можно пренебречь в короткоимпульсных устройствах, представляет собой серьезную проблему в данной области применения и заслуживает тщательного анализа. Однако это выходит за рамки настоящей статьи.

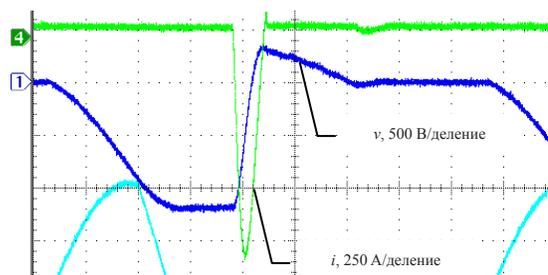


Рис. 8. Напряжение конденсатора и ток нагрузки при 23 °С

## ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы благодарят г-на К. Карпа, г-на Р. МакАртура, г-на Дж. ЛаМонтен и г-на Д. Райана из компании Spellman High Voltage Electronics Corporation за неоценимую помощь при разработке и проведении экспериментов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] A. Pokryvailo, M. Wolf, Y. Yankelevich, S. Wald et al., “High-Power Pulsed Corona for Treatment of Pollutants in Heterogeneous Media”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, October 2006, pp. 1731–1743.
- [2] P. L. Kalantarov and L. A. Zeitlin, Inductance Calculation, 3rd Ed., Leningrad, EnergoAtomIzd, 1986 (in Russian).
- [3] D. B. Fenneman and R.J. Gripshover, “High Power Dielectric Properties of Water Mixtures”, Proc. 2nd Pulsed Power Conf., 1983, pp. 302-307.
- [4] M. Zahn, Y. Ohki, D. B. Fenneman, R. J. Gripshover, and V. H. Gehman, “Dielectric Properties of Water and Water/Ethylene Glycol Mixtures for Use in Pulsed Power System Design”, Proc. IEEE, vol. 74, No. 9, Sept. 1986, pp. 1182–1221.
- [5] Encyclopedia of Chemistry, vol. 5, p. 984. Ed. N. Zefirov, Bolshaya Rossijskaya Enziklopedia, Moscow, 1998 (in Russian).
- [6] J. Liu, X. Cheng, J. Pu, J. Zhang, “Experimental Study of the Electrical Characteristics of Ethylene Glycol/Water Mixtures in the Microsecond Regime”, IEEE Electrical Insulation Mag., Nov/Dec 2007—Vol. 23, No. 6, pp. 20-25.
- [7] Impulse Breakdown of Liquids, Ed. V. Y. Ushakov, Springer, 2007, p. 283-284.
- [8] CRC Handbook of Physics and Chemistry, 82nd Ed., Ed. D. R. Lide, CRC Press, 2002.