

Корректор коэффициента мощности как фактор повышения эффективности

систем электропитания подвижных объектов

В статье дано определение коэффициента мощности нагрузки λ и перечислены проблемы в системе энергоснабжения объектов, связанные с его низким значением. Рассмотрен эффективный способ увеличения λ до значений, близких к 1, с кратким описанием и принципом работы АККМ на основе микросхемы UC2854 (Texas Instruments). Предложены два метода построения модулей питания с АККМ. Применение АККМ рассмотрено на примере конкретной реализации в модуле питания производства ООО «Александр Электрик источники электропитания», а также дана сравнительная оценка параметров двух аналогичных по мощности модулей — с АККМ и без него.

Сергей Чугунов

chugunov@aeip.ru

Как известно, коэффициент мощности λ определяется соотношением активной мощности, потребляемой источником питания, и полной мощности:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos(\varphi_1)}{UI} = \frac{I_1 \cos(\varphi_1)}{I},$$

где U и I — действующие значения соответственно напряжения и тока на входе источника питания, а в числителе формулы произведение действующих значений напряжения и тока первой гармоники и косинуса угла сдвига между ними [1]. Таким образом, λ потребителя электрической энергии определяется не только значением $\cos \varphi_1$, но и коэффициентом нелинейных искажений тока относительно его первой гармоники. Это значит, что при $\lambda < 1$ ($\lambda = 1$ характерно для линейной активной нагрузки) увеличивается ток во всех цепях, от генератора до нагрузки, при одной и той же потребляемой активной мощности. А потери, как известно, имеют квадратичную зависимость от тока. Кроме того, высшие гармоники тока, создаваемые нелинейными потребителями, приводят к увеличенным потерям в линиях электропередачи, в магнитопроводах трансформаторов, генераторов и их обмотках. Сокращается срок службы изоляции, создаются дополнительные нагрузки на валу генераторов, увеличивается нагрев и расход топлива.

В быту это не имеет большого значения, поскольку указанные выше проблемы ложатся на плечи энергоснабжающих организаций, а потребитель платит лишь за активную мощность. Однако в случаях, когда речь идет о подвижных объектах, электроснабжение которых производится от генераторов переменного тока, с λ приходится считаться. Так, например, при имеющемся на объекте генераторе в 125 кВА полной мощности при коэффициенте мощности нагрузки $\lambda = 0,8$ допустимая активная мощность нагрузки составляет только 100 кВт. При более низких значениях λ , например $\lambda = 0,5$, для получения тех же 100 кВт номинальной мощности потребуются генератор уже на 200 кВА, т. е. в 1,6 раза мощнее [1]. При этом на меньших нагрузках генератор будет недогружен. Это означает больший расход топлива, большие эксплуатационные расходы и большую стоимость самого генератора. Очевидно, что применение блоков и модулей питания с высоким λ в системах энергоснабжения на подвижных объектах снижает не только эксплуатационные расходы, но и массо-габаритные показатели, являющиеся важной характеристикой для мобильных систем электропитания (СЭП).

Для увеличения λ до значений, близких к 1, в модулях питания применяются активные корректоры коэффициента мощности (АККМ). Типовая функциональная схема АККМ показана на рис. 1.

АККМ состоит из входного фильтра, выпрямителя, повышающего преобразователя и выходного фильтра. Как видно, АККМ устроен достаточно просто. Однако к его элементам предъявляются свои требования. Так, например, выпрямительный диод D1 желательно применять с малым временем восстановления, поскольку одно только применение такого диода на основе карбида кремния (SiC) с малым временем обратного восстановления способно уменьшить потери в диоде D1 и транзисторе Q1 на 32% [2]. Дроссель L1 должен быть рассчитан на постоянное подмагничивание полным током на максимуме синусоиды питающей сети при минимальном входном напряжении на входе, поскольку именно в этом режиме ток дросселя максимальный. Все элементы корректора должны выдерживать долговременную работу, а элементы охлаждения — обеспечивать необходимый теплоотвод при пониженном входном напряжении сети. Внимание на этом акцентируется в связи с тем, что АККМ, в силу своей топологии, могут работать в большом диапазоне входных напряжений, что широко используется для построения источников питания для входной сети переменного тока 85–264 В. При этом статические потери, пропорциональные квадрату тока, на пониженном входном напряжении в 30 раз выше потерь при максимальном входном напряжении. Если же диапазон питающих напряжений АККМ уже и организована корректная защита элементов от высоких токов при пониженном входном напряжении, требования по теплоотводу и максимальным токам через элементы корректора можно значительно снизить.

В рассмотренном на рис. 1 АККМ применена микросхема UC2854, позволяющая стабилизировать выходное напряжение корректора. Алгоритм ее работы позволяет следить за средним током дросселя, работающего в режиме неразрывных токов при нагрузках более 50%

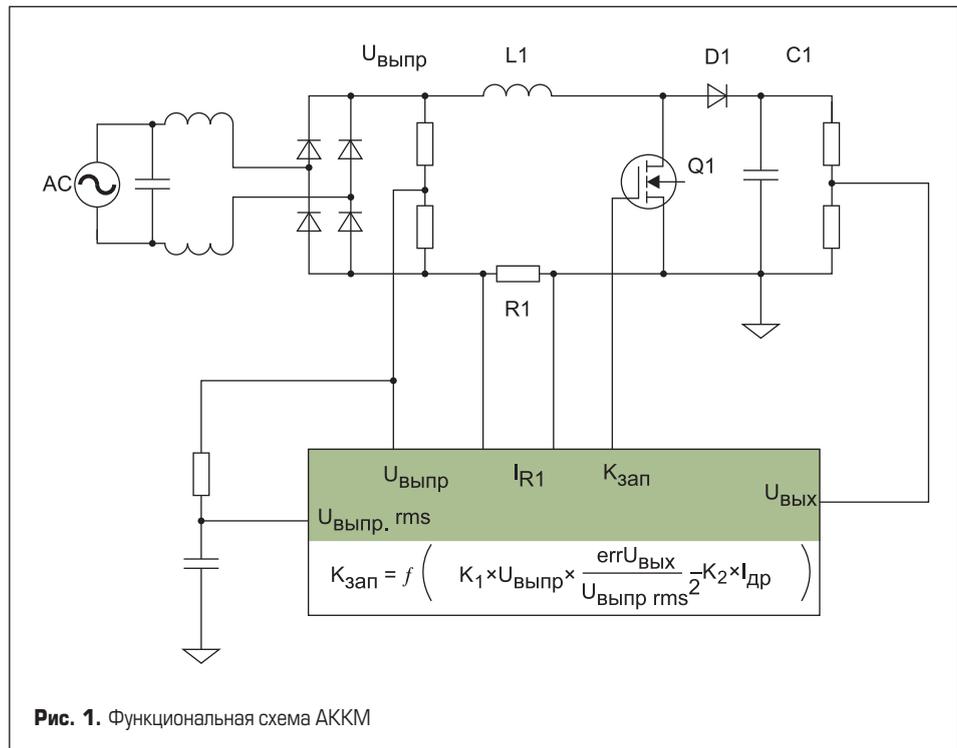


Рис. 1. Функциональная схема АККМ

от $P_{ном}$. Это, в свою очередь, снижает требования к фильтрации, уменьшает помехи и увеличивает КПД преобразования.

В АККМ, построенном на основе микросхемы UC2854 [3], используется четыре сигнала обратной связи:

- сигнал с выхода диодного моста, используемый как опорный для формирования тока потребления, повторяющего форму входного напряжения;
- сигнал с датчика тока для формирования тока и функций защиты;
- сигнал с выхода АККМ для стабилизации выходного напряжения на уровне 400 В;
- среднеквадратичное значение напряжения сети.

Управляющим сигналом контроллера является ШИМ, подающаяся на коммутирующий

элемент Q1. При этом коэффициент заполнения является функцией мгновенного значения выпрямленного напряжения, ошибки сигнала рассогласования обратной связи по выходному напряжению ККМ, действующего значения напряжения сети и текущего значения тока в дросселе:

$$K_{зап} = f\left(K_1 \times \frac{U_{авсп} \times err U_{авх}}{U_{авсп,rms}^2} - K_2 \times I_{др}\right).$$

Согласно этому уравнению, в дросселе корректора L1 формируется ток, огибающая которого повторяет форму напряжения на выходе выпрямителя (рис. 2), а форма тока потребления АККМ повторяет форму сетевого напряжения (рис. 3), что по-

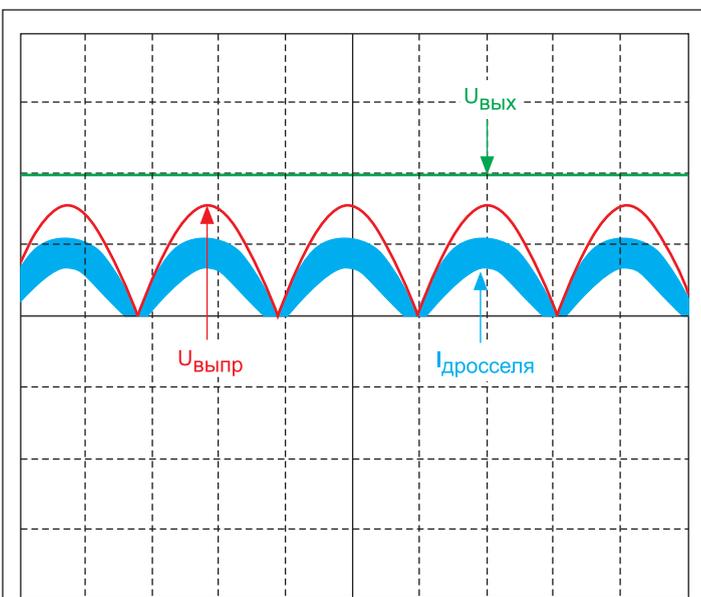


Рис. 2. Форма тока дросселя, напряжения после диодного моста и напряжения на выходе АККМ

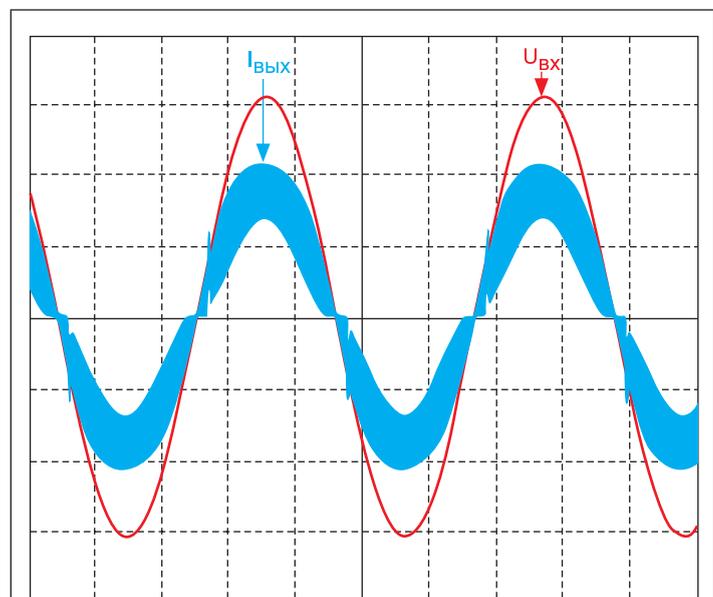


Рис. 3. Напряжение и ток на входе АККМ до фильтрации

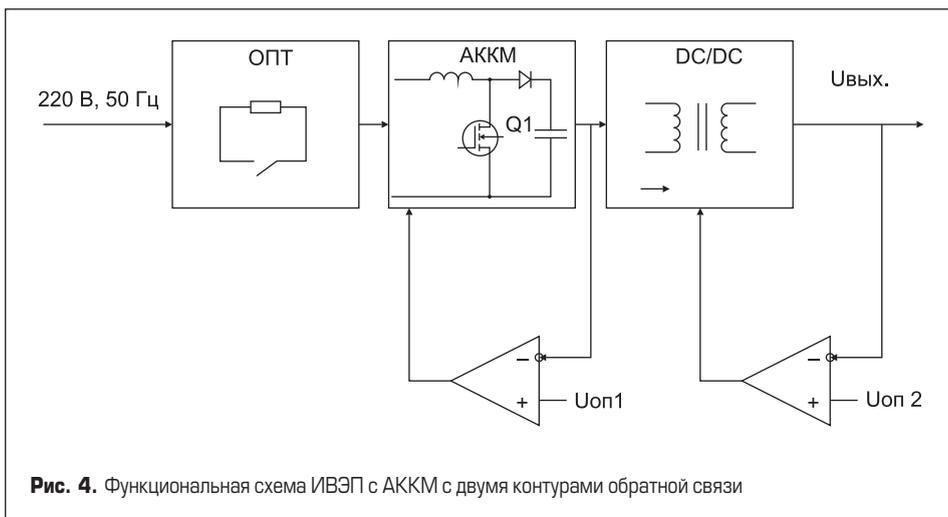


Рис. 4. Функциональная схема ИВЭП с АККМ с двумя контурами обратной связи

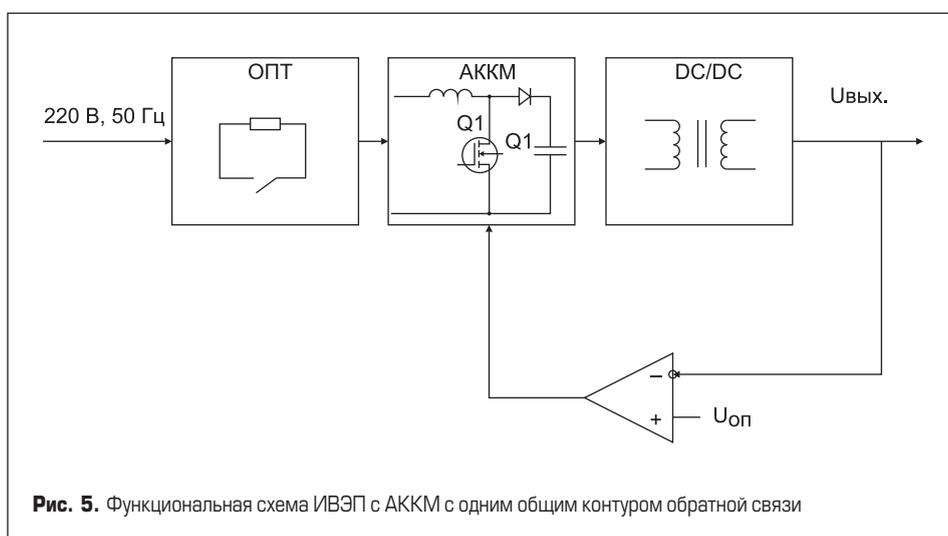


Рис. 5. Функциональная схема ИВЭП с АККМ с одним общим контуром обратной связи

вом случае (рис. 4) понижающий преобразователь с гальванической развязкой запитывается с выхода АККМ стабилизированным напряжением 400 В. Низкочастотные пульсации и переходные процессы этого источника хорошо отфильтровываются глубокой и быстрой обратной связью выходного преобразователя. Выходной LC-фильтр демпфирован токовой обратной связью. Переходный процесс при сбросе и набросе нагрузки носит апериодический характер, амплитуда переходного процесса не превышает 10% от выходного напряжения. Выходной преобразователь с гальванической развязкой может быть построен по любой топологии, однако максимальную эффективность будет иметь преобразователь с фазовым управлением либо резонансный преобразователь. Модуль питания, построенный по такой схеме, имеет высокий общий КПД.

В том случае, если модуль питания построен по функциональной схеме, изображенной на рис. 5, где АККМ питает выходной неуправляемый преобразователь, стабилизация выходного напряжения осуществляется за счет коррекции выходного напряжения АККМ. К недостаткам такой схемы следует отнести низкую стабильность выходного напряжения, увеличенные пульсации выходного напряжения на частоте питающей сети и высокочастотные колебания при сбросе и набросе нагрузки из-за не охваченного токовой обратной связью колебательного контура, состоящего из выходной емкости и индуктивности. Однако выходной преобразователь может быть реализован с помощью неуправляемого полного моста, в котором переключение транзисторов будет всегда происходить с максимальным коэффициентом заполнения и минимальными потерями за счет включения при нулевом напряжении даже без фазосдвигающего контроллера. Это упрощает конструкцию

звляет достичь λ , близкого к 1. На выходе же АККМ вырабатывается стабилизированное напряжение 400 В.

С учетом того, что на выходе АККМ напряжение стабилизировано, следующая ступень преобразователя может быть выполнена с максимальным коэффициентом

заполнения — с тем, чтобы добиться максимального КПД преобразователя в целом. На рис. 4 и 5 представлены функциональные схемы таких преобразователей [4].

На входе модулей питания присутствует ограничитель пускового тока (ОПТ). В пер-

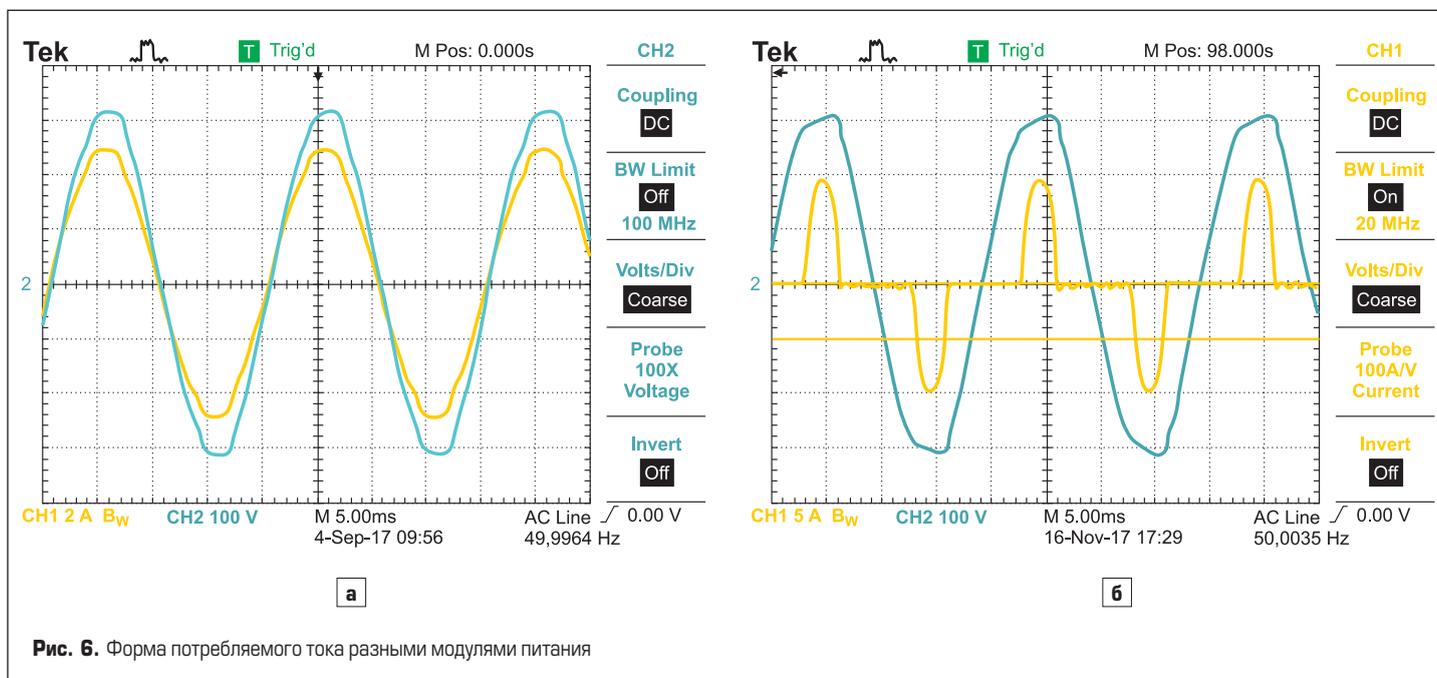


Рис. 6. Форма потребляемого тока разными модулями питания

преобразователя и делает его КПД максимальным.

Примером реализации ИВЭП с АККМ может быть модуль питания МАА600-ПКМ, разработанный в ООО «Александр Электрик источники электропитания». Модуль построен по схеме, изображенной на рис. 4, и имеет низкопрофильную конструкцию. Высота корпуса составляет всего 22 мм. Габариты корпуса составляют 242×132×22 мм. Форма питающего напряжения и потребляемого модулем питания тока показана на рис. 6а. Для сравнения на рис. 6б представлена осциллограмма напряжения сети и тока потребления аналогичного модуля питания МАА600-1С27-СКН без АККМ [5].

На рис. 7 показаны сравнительные измерения λ модулей питания МАА600-1С27-ПКМ с АККМ и МАА600-1С27-СКН без АККМ. Коэффициент мощности модуля питания МАА600-1С27-ПКМ практически не зависит от входного напряжения и укладывается в пределы $\lambda = 0,98 \dots 0,99$ во всем его диапазоне.

На рис. 8 и 9 показаны зависимости КПД модулей питания МАА600-1С27-ПКМ с АККМ и МАА600-1С27-СКН без АККМ соответственно.

Основные технические характеристики модуля питания МАА600-1С27-ПКМ:

- коэффициент мощности $\lambda = 0,98 \dots 0,99$ при нагрузках от $0,1 \times P_{ном}$ до $P_{ном}$;
- КПД при $P_{ном}$ — 84%;
- диапазон напряжения питания переменного тока частотой 50 Гц — 120–242 В;
- выходное напряжение постоянного тока — 27 В;
- суммарная нестабильность выходного напряжения не более $\pm 3\%$ от $U_{вых}$;
- амплитуда пульсации выходного напряжения не более 1% от $U_{вых}$;
- подстройка выходного напряжения $\pm 5\%$ от $U_{вых}$;
- диапазон рабочих температур корпуса $-60 \dots +85$ °С;
- габариты, мм: 242×132×22.

Выводы

При сопоставлении графиков, изображенных на рис. 8 и 9, видно, что КПД модуля питания с АККМ на номинальной мощности ниже на 3%, чем модуля питания без корректора. Однако такая потеря КПД с лихвой компенсируется увеличением коэффициента мощности λ с 0,6–0,76 до значений, близких к 1. Кроме того, модуль питания МАА600-1С27-ПКМ имеет массу в среднем в 1,5 раза, а габариты — в 1,77 раза меньше, чем аналогичные показатели у модуля питания МАА600-1С27-СКН. Следует учитывать также расширение температурного диапазона нового модуля до -60 °С по сравнению с -50 °С у модуля МАА600-1С27-СКН. Все это делает применение модуля питания МАА600-1С27-ПКМ более эффективным в системах электропитания подвижных объектов.

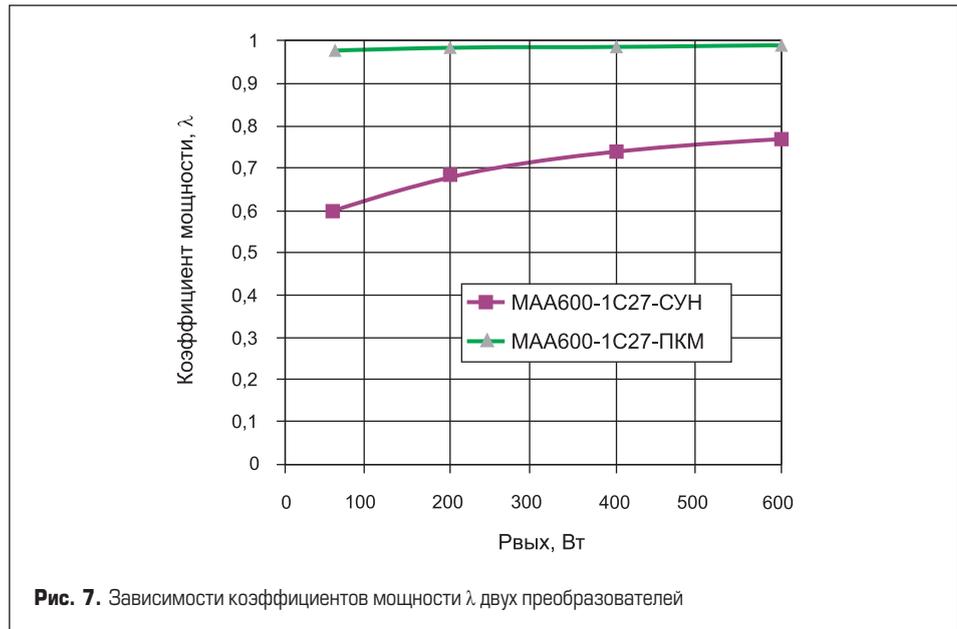


Рис. 7. Зависимости коэффициентов мощности λ двух преобразователей

Литература

1. Котенко Е. А. Компенсация реактивной мощности как средство сокращения затрат // Энергоснабжение. 2010. № 1.
2. Мелешин В. И., Овчинников Д. А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011.
3. Texas Instruments. Advanced High-Power Factor Preregulator Slus329e—Month 2003. Rev. January, 2008.
4. Philip C. Todd Application Note U-134 UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design 1999. Texas Instruments Incorporated.
5. Каталог продукции ООО «АЭИЭП», 2013.

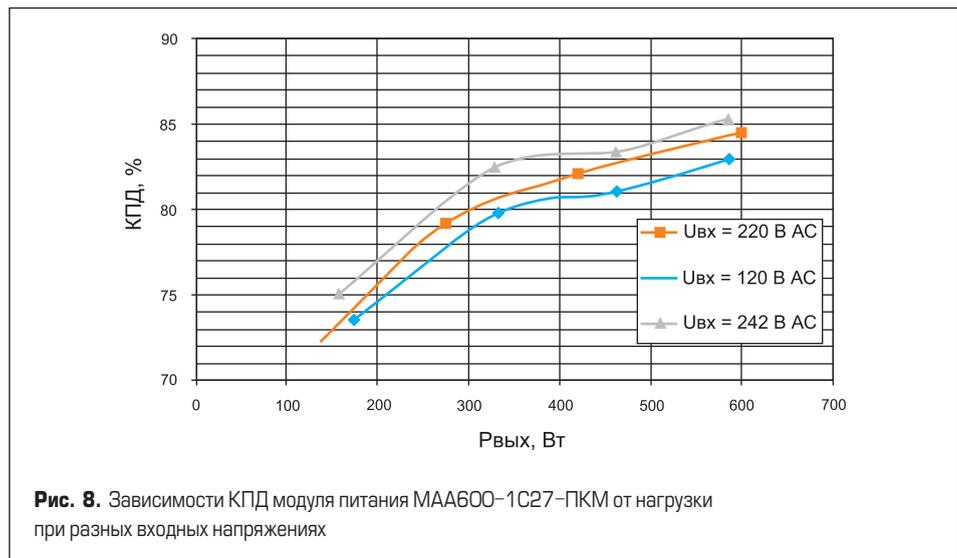


Рис. 8. Зависимости КПД модуля питания ММА600-1С27-ПКМ от нагрузки при разных входных напряжениях

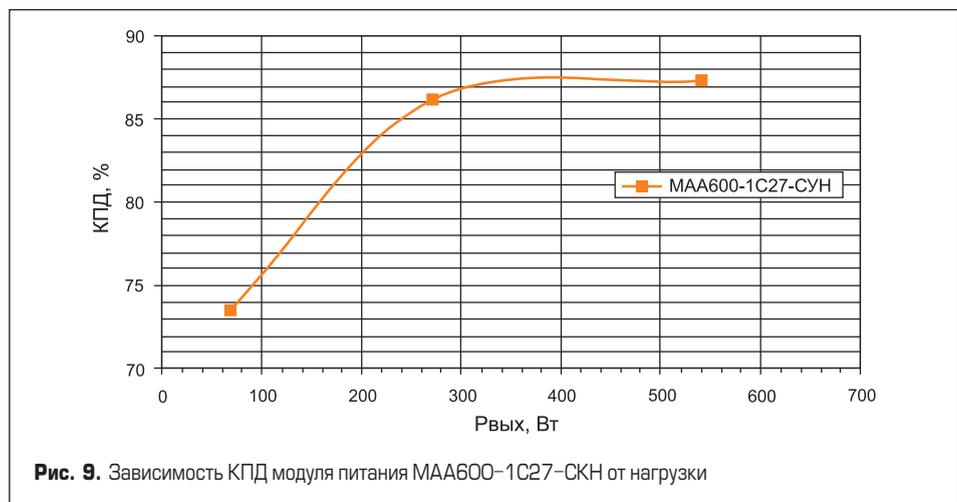


Рис. 9. Зависимость КПД модуля питания ММА600-1С27-СКН от нагрузки