

УДК 622.861: 622.237.7

В. П. КОЛОСЮК, *д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, МакНИИ*
В. И. ТИМЧЕНКО, *канд. техн. наук, зав. кафедрой, ДонНАСА,*
г. Макеевка

ПОЛЕЗНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассмотрены закономерности основных параметров системы импульсного питания с однофазным выпрямлением переменного тока. Показано, что используя реактивную энергию системы импульсного питания, можно увеличить полезную мощность потребителя и уменьшить потребляемую мощность от источника.

Ключевые слова: импульсное питание, линия, потребитель, нагрузка, активное сопротивление, индуктивность, ток, напряжение, мощность, искробезопасность, электрическая дуга.

В системах электроснабжения обычно различают активную и реактивную энергию потребителей. Активная энергия создает положительный эффект, т.е. преобразуется в тепло в различных нагревателях, в механическую работу привода различных машин и механизмов и др.

Реактивная энергия не создает работу, и обычно считается не полезной, но она необходима для создания электрического поля в трансформаторах, электродвигателях и других устройствах, где имеются катушки, обмотки, обладающие большим индуктивным сопротивлением.

Из-за потребления реактивной энергии требуется увеличение мощности источников питания, вследствие чего ток в питающих линиях и потери напряжения увеличиваются, требуется большее сечение проводов в линиях, снижается коэффициент мощности энергосистемы и возникают другие негативные последствия.

В настоящее время импульсное (прерывистое) питание используется для регулирования различных электроприводов [1, 2]. Такое регулирование предусматривает изменение времени паузы между импульсами тока, вследствие чего изменяется среднее значение напряжения, подаваемого на электродвигатель, а, следовательно, и его электромеханические характеристики: скорость вращения и момент на валу.

Импульсное питание может применяться в системах защиты контактных сетей рудничной электровозной откатки, а также в системах электро- и искробезопасности [3].

Как известно, в электрических цепях с индуктивностью (катушки с железом, обмотки электродвигателей и электромагнитов и т.п.) при изменении величины электрического тока происходит возникновение изменяющегося магнитного поля и возникает ЭДС самоиндукции. В момент нарастания тока в цепи ЭДС самоиндукции противодействует нарастанию тока, а в момент спада тока она поддерживает протекание тока в цепи за счет запасенной реактивной энергии.

Обычно в системах электроснабжения стремятся принимать меры по компенсации реактивной индуктивной энергии емкостной энергией, а вопросы применения способов и мер полезного использования реактивной индуктивной энергии проработаны недостаточно. Вместе с тем полезное использование реактивной энергии можно рассматривать как актуальную в современных условиях проблему энергосбережения, чем предопределена и актуальность настоящей работы.

Целью работы является установление условий полезного использования реактивной энергии в импульсных системах питания нагрузки, имеющей значительное индуктивное сопротивление, и обоснование перспектив применения таких систем в промышленности.

Использована идея: нагрузка системы электроснабжения, имеющая активное сопротивление и индуктивность, питается импульсами выпрямленного тока с определенной паузой, на время паузы питающую линию и источник тока запирают или выключают, а саму нагрузку шунтируют вентилем, включенным встречно току источника, обеспечивая возврат запасенной в индуктивности энергии в собственную цепь нагрузки и предотвращая ее разряд в цепи источника и питающей линии.

Как пример, для исследований рассматривалась система импульсного питания с однофазным выпрямителем переменного тока частотой 50 Гц, которая является самой простой и наглядной (рис.1). Устанавливались основные закономерности электрических параметров системы (мгновенные, средние и эффективные токи), определялась средняя (активная) и полная мощность в питающей линии, нагрузке и шунтирующем вентиле (диоде).

Использованы теоретические методы анализа электрических цепей и физическое моделирование систем импульсного питания. Определение электрических параметров в цепях выполнялось с использованием компьютерной программы.

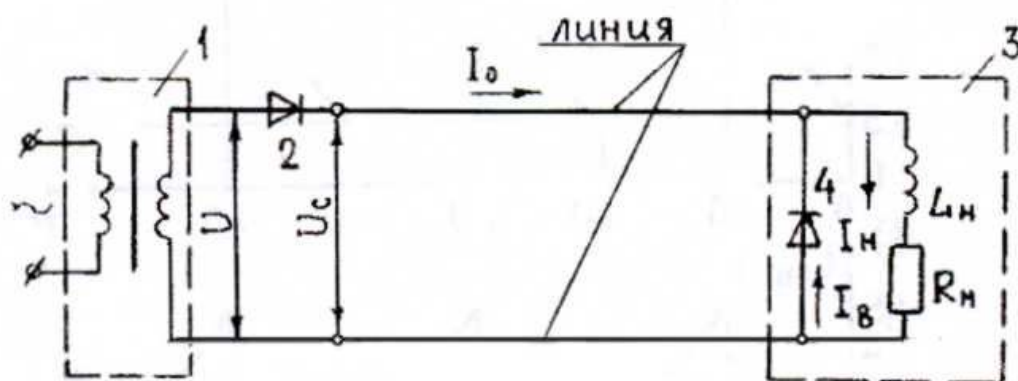


Рис. 1. Принципиальная схема системы импульсного питания с однофазным выпрямлением переменного тока

Выпрямление тока осуществляется вентилем (диодом) 2, а нагрузка 3, имеющая индуктивность L_n и сопротивление R_n , шунтируется вентилем (диодом) 4. Поскольку вентиль 2 проводит ток только в одном направлении, когда более положительным является его анод, и не проводит ток, когда более положительным является его катод, выходное напряжение является пульсирующим и представлено синусоидальными периодическими импульсами с амплитудой U_m . После каждого импульса напряжения образуется пауза такой же длительности, как и импульсы напряжения. Благодаря такому построению системы импульсного питания в течение первой полусинусоиды переменного напряжения, когда действует импульс напряжения, к нагрузке по питающей линии подходит импульс тока i_u . При этом в нагрузке наводится ЭДС самоиндукции. В течение второй полусинусоиды переменного напряжения вторичной обмотки трансформатора вентиль 2 заперт, что эквивалентно отключению источника. В это время ток в линии отсутствует, но в цепи нагрузки ток продолжает протекать и в течение паузы (i_u) за счет действия ЭДС самоиндукции. Разряд запасенной магнитной энергии осуществляется благодаря вентилю 4, который во время паузы напряжения является отпертым, т.к. его анод более положительный, чем катод. В первый полупериод вентиль 4 заперт положительным импульсным напряжением, поэтому шунтирование нагрузки осуществляется только во второй полупериод, т.е. в течение пауз питающего напряжения.

В такой схеме импульсного питания $t_{и} = t_{п} = \frac{T}{2}$, а мгновенное напряжение в течение импульса определяется выражением $u = U_m \sin(\omega t)$. Угловая частота $\omega = 2\pi f = 2\frac{\pi}{T}$, где $f = 50$ Гц – частота следования импульсов.

Среднее за период T выпрямленное напряжение системы импульсного питания с однопериодным выпрямителем будет:

$$U_c = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin(\omega t) dt.$$

В результате интегрирования получим:

$$U_c = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U, \quad (1)$$

где U_m и U – соответственно амплитудное и действующее синусоидальное напряжение вторичной обмотки питающего трансформатора.

Мгновенное значение тока в линии от источника в течение первого импульса выпрямленного напряжения определяется дифференциальным уравнением:

$$U_m \sin(\omega t) = R_{H1} + L_H \cdot \frac{di}{dt}.$$

При решении получим [3]:

$$i = I_m \cdot [\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-\delta t}], \quad (2)$$

где $I_m = \frac{U_m}{Z}$ – амплитуда выпрямленного тока;

$Z = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$ – кажущееся сопротивление цепи нагрузки;

$X_H = \omega \cdot L_H = 2\pi f L_H$ – индуктивное сопротивление нагрузки на частоте $f = 50$ Гц;

$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega \cdot L_H}{R_H}\right)$ – угол сдвига тока относительно напряжения;

$\delta = \frac{R_H}{L_H}$ – коэффициент затухания цепи;

t – координата времени действия импульса напряжения в промежутке $0 \dots 0,01$ с;

$t_2 = \frac{T}{2} = 0,01$ с – координата времени конца паузы;

$t_1 = \frac{T}{2} = 0,01$ с – координата времени конца импульса.

Мгновенное значение тока в цепи нагрузки в течение первой паузы (ток вентиля 4), обусловленное ЭДС самоиндукции нагрузки, определяется уравнением:

$$i = I_m \cdot [\sin(\omega t_1 - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-\delta t_1}] \cdot e^{-\delta t}. \quad (3)$$

Поскольку $\omega t_1 = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} = \pi$, $t_1 = \frac{T}{2}$ получим

$$i = I_m \cdot \sin \varphi \cdot \left(1 + e^{-\delta \cdot \frac{T}{2}} \right) \cdot e^{-\delta \cdot t}. \quad (4)$$

В течение паузы в нагрузку отдается реактивная энергия магнитного поля, запасенная в индуктивностях в течение времени нарастания тока, обусловленного напряжением источника. Ток нагрузки в этот период времени протекает через вентиль 4, который в проводящем направлении имеет весьма малое сопротивление, и сопротивление цепи определяется фактически только сопротивлением нагрузки. Если пауза соизмерима с постоянной времени нагрузки $t = \frac{L_H}{R_H}$, энергия от ЭДС самоиндукции к концу паузы не успевает «разрядиться» и ток в нагрузке $i > 0$. Благодаря этому ток в нагрузке в начале второго импульса начинается не с нуля, а с тока, который имел место в конце первой паузы.

В конце импульса напряжения практически мгновенно запирается вентиль 2 и ток в линии, поступающий от источника, становится равным нулю. Поэтому ток линии и является прерывистым (импульсным).

По окончании паузы опять в линии начинает протекать ток от источника. Но теперь нарастающее изменение тока нагрузки снова вызовет возникновение противодействующей ЭДС самоиндукции, стремясь уменьшить нарастание тока.

Мгновенные значения токов в течение других импульсов и пауз определим по способу индукции («шаг за шагом»). В установившемся режиме (при $N \rightarrow \infty$) ток в течение импульса равен:

$$i_{Nu} = I_m \cdot \sin \varphi \cdot \frac{1}{1 - e^{-\delta \cdot \frac{T}{2}}} \cdot e^{-\delta \cdot t} + I_m \cdot \sin (\omega t - \varphi). \quad (5)$$

Ток в течение паузы:

$$i_{Nu} = I_m \cdot \sin \varphi \cdot \frac{1}{1 - e^{-\delta \cdot \frac{T}{2}}} \cdot e^{-\delta \cdot t}. \quad (6)$$

По полученным формулам построены зависимости мгновенных значений токов в линии i_{Nu} , в цепи шунтирующего вентиля i_{NB} и в цепи нагрузки при следующих данных: $U = 24$ В, $L_H = 0,1$ Гн, $X_H = 31,4$ Ом, $R_H = 100$ Ом, $Z = 33$ Ом, $\delta = 100$ с⁻¹, $\varphi = 72^\circ 20'$ (рис. 2). Эти зависимости иллюстрируют непрерывность тока в цепи нагрузки, а также главную особенность схемы о том, что ток в линии представлен импульсами, чередующимися с паузами, в течение которых в линии ток отсутствует.

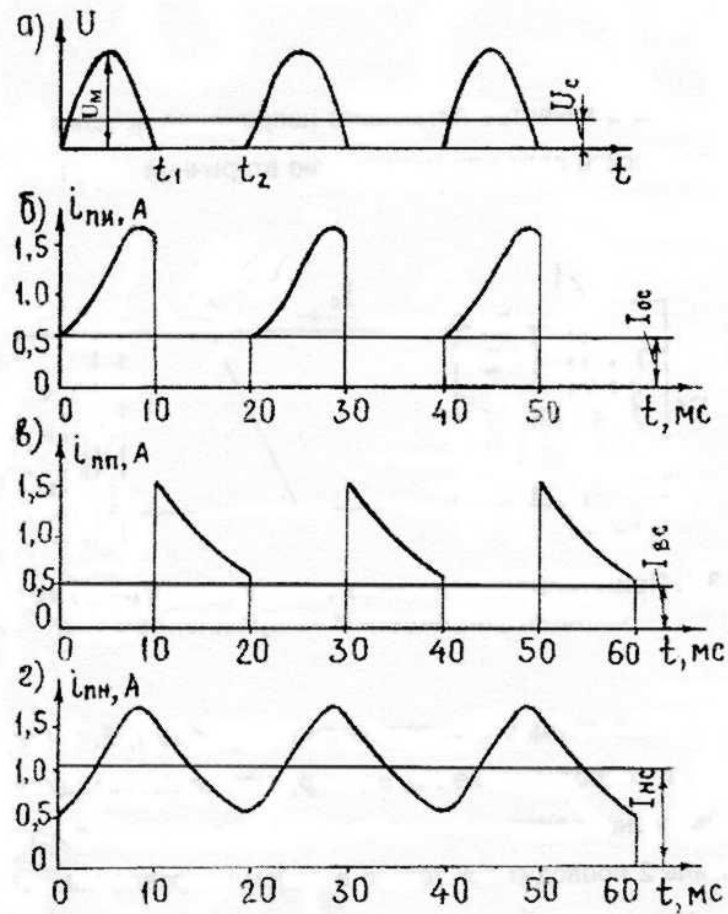


Рис. 2. Мгновенное значение электрических параметров схемы в установившемся режиме по истечению большого числа импульсов
 а) выпрямленное напряжение; б) ток в линии (ток импульса);
 в) ток в цепи шунтирующего вентиля; г) ток в цепи нагрузки

В нагрузке ток предоставлен последовательными импульсами тока в линии ($i_{лп}$) – искаженной синусоидальной формы и тока паузы ($i_{лп}$) – экспоненциальной формы. Это подтверждается и осциллограммами тока нагрузки (рис. 3), иллюстрирующими процесс установления тока нагрузки с течением времени. В первый момент при включении схемы ток первого импульса ($i_{лп}$) начинается с нуля, но уже ток второго импульса ($i_{лп}$) начинается не с нуля, а с тока конца паузы ($i_{лп}$). Через несколько импульсов наступает установившийся режим (рис. 3, б).

Напряжение представлено полусинусоидальными импульсами (величиной $I_c = 4,4 A$ – представлен средний выпрямленный ток в установившемся режиме) и средние значения параметров схемы на рис. 2 показаны сплошными горизонтальными линиями.

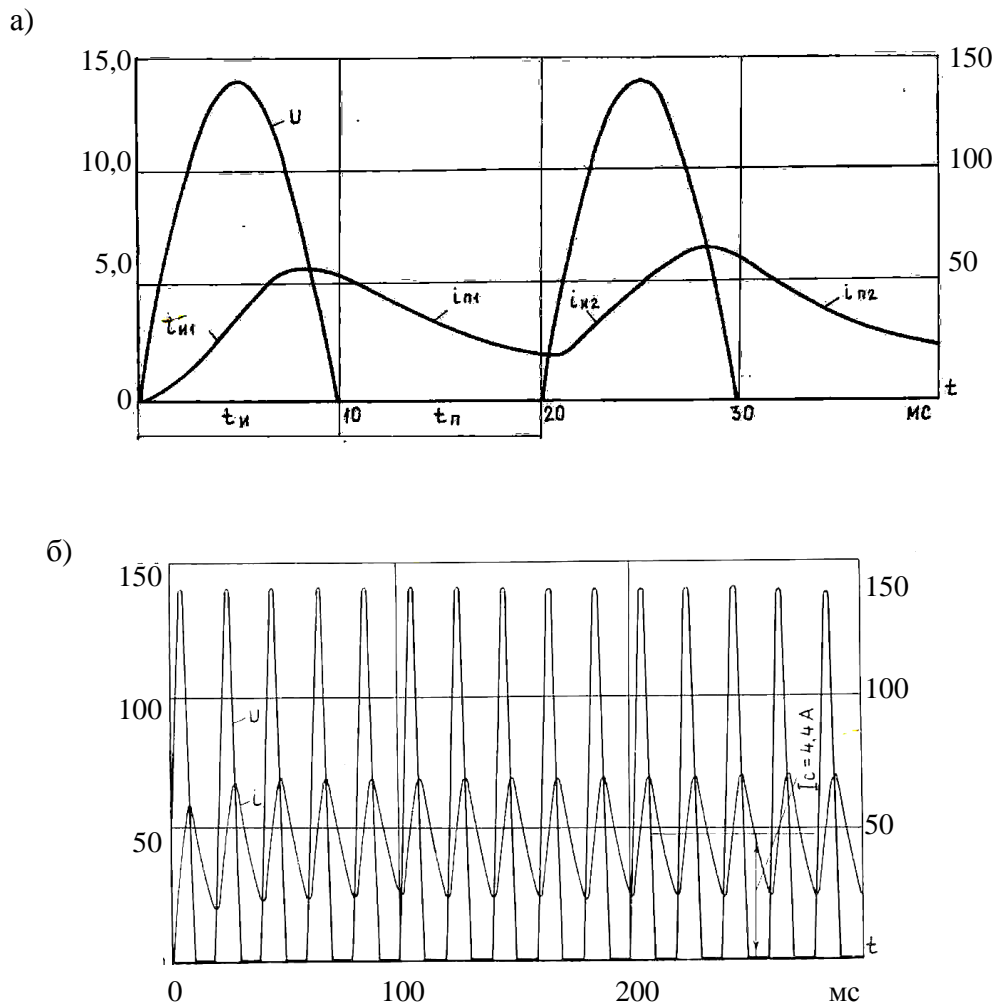


Рис. 3. Осциллограммы мгновенного тока загрузки (i) при $U = 100$ В,
 $R_u = 10$ Ом; $L_H = 0,1$ Гн:
а) – в переходном режиме в течение 2-х импульсов напряжения ($t = 40$ мс);
б) – в установившемся режиме в течение времени $t = 300$ мс

Из осциллограммы видно, что в установившемся режиме ток нагрузки можно представить как сумму среднего выпрямленного (постоянного) тока и переменного тока частотой 50 Гц (первой гармонии).

Таким образом, с каждым последующим импульсом величина тока возрастает и при большом числе импульсов, т.е. в установившемся режиме ток импульса и, следовательно, ток в нагрузке начинается с некоторого значения, соответствующего току конца паузы, о чем свидетельствует осциллограмма тока нагрузки рис. 3.

Средние за период T частотой 50 Гц значения тока линии ($I_{ЛС}$), тока в цепи шунтирующего вентиля ($I_{ВС}$), а также тока нагрузки ($I_{НС}$) определим по выражениям:

$$I_{\text{ЛС}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} i_{\text{Nu}} dt ,$$

$$I_{\text{ВС}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_2} i_{\text{Nu}} dt ,$$

$$I_{\text{НС}} = I_{\text{ЛС}} + I_{\text{ВС}} .$$

Подставляя полученные выражения для мгновенных токов, получим:

$$I_{\text{ЛС}} = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot Z^2} \left(2R + \frac{X_H}{R_H} \right), \quad (7)$$

$$I_{\text{ВС}} = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot Z^2} \cdot \frac{X_H^2}{R_H}, \quad (8)$$

$$I_{\text{НС}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\pi \cdot R_H}. \quad (9)$$

Из последнего выражения видно, что среднее значение тока в цепи нагрузки не зависит от индуктивности и определяется как для безындуктивной цепи, имеющей активное сопротивление R_H .

Если ток в нагрузке не зависит от отношения $m = \frac{X_H}{R_H}$, то ток в линии уменьшается с увеличением m , а ток в шунтирующей цепи увеличивается.

Баланс средних токов в системе импульсного питания (рис. 4) показывает, что с увеличением индуктивности нагрузки ток в линии уменьшается и в пределе равен половине тока нагрузки.

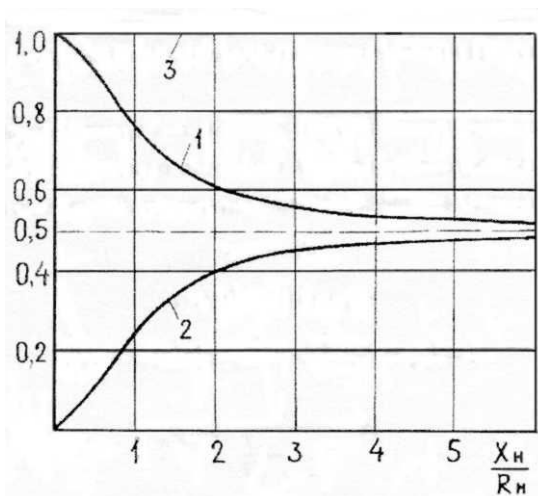


Рис. 4. Зависимости $I_{\text{ЛС}}$ и $I_{\text{ВС}}$ от $\frac{X_H}{R_H}$:

1 – зависимость отношения $\frac{I_{\text{ЛС}}}{I_{\text{НС}}}$;

2 – зависимость отношения $\frac{I_{\text{ВС}}}{I_{\text{НС}}}$;

3 – средний ток нагрузки $I_{\text{НС}}$ принят за единицу.

Расчеты показывают, что при $X_H \rightarrow \infty$ ($L_H \rightarrow \infty$) ток в нагрузке в 2 раза превышает ток линии. С уменьшением индуктивного сопротивления ток нагрузки уменьшается и при $X_H = 0$ ток нагрузки равен току линии.

Мгновенная мощность, поступающая к нагрузке от источника по линии, определяется как произведение мгновенных значений питающего напряжения и тока

$$p_{\text{л}} = u \cdot i.$$

Средняя (активная) мощность за период будет:

$$p_{\text{лс}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} p_{\text{л}} dt.$$

Выполнив интегрирование и некоторые преобразования, получим [3]:

$$p_{\text{лс}} = \frac{U^2}{R_H} \cdot \frac{1}{1+m^2} \cdot \left[\frac{m^3}{(1+m^2) \cdot \pi} \cdot \frac{1+e^{-\frac{\pi}{m}}}{1-e^{-\frac{\pi}{m}}} + \frac{1}{2} \right] \quad (10)$$

Мгновенная мощность, поступающая в нагрузку за счет ЭДС самоиндукции, определяется как произведение тока, протекающего в цепи шунтирующего вентиля во время паузы, и ЭДС самоиндукции, равной $e = i_{Nn} \cdot R_H$:

$$p_B = i_{Nn}^2 \cdot R_H. \quad (11)$$

Среднее значение мощности за период:

$$p_{\text{вс}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} p_B dt.$$

После интегрирования и преобразования получим:

$$p_{\text{вс}} = \frac{U^2}{2 \cdot \pi \cdot R_H} \cdot \left[\frac{m^3}{(1+m^2)^2} \cdot \frac{1+e^{-\frac{\pi}{m}}}{1-e^{-\frac{\pi}{m}}} \right]. \quad (12)$$

В нагрузке мгновенная мощность в течение импульса соответствует мгновенной мощности в линии $p_{\text{л}}$, а в течение паузы – мгновенной мощности в цепи шунтирующего вентиля p_B . Средняя мощность в нагрузке равна сумме средних мощностей $p_{\text{лс}}$ и $p_{\text{вс}}$:

$$P_{MC} = P_{ЛС} + P_{ВС} = \frac{U^2}{R_H} \cdot \frac{1}{1+m^2} \cdot \left[1,5 \cdot \frac{m^3}{(1+m^2) \cdot \pi} \cdot \frac{1+e^{-\frac{\pi}{m}}}{1-e^{-\frac{\pi}{m}}} + \frac{1}{2} \right]. \quad (13)$$

Таким образом, средняя мощность в нагрузке, также как и средняя мощность в линии и в цепи шунтирующего вентиля, зависит от отношения индуктивного сопротивления к активному (рис. 5).

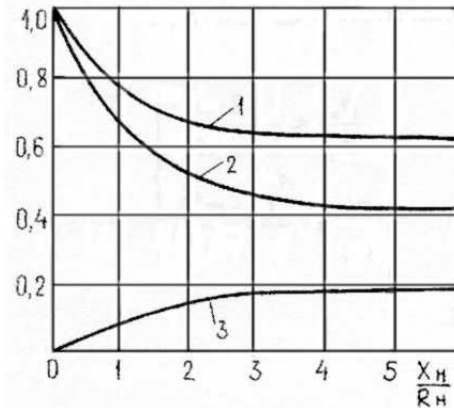


Рис. 5. Зависимости средней мощности в относительных величинах от от-

ношения $\frac{X_H}{R_H}$: 1 – поступающей от источника $\frac{P_{ЛС}}{P_{АС}}$; 2 – в нагрузке $\frac{P_{НС}}{P_{АС}}$;

3 – в линии $\frac{P_C}{P_{АС}}$; 4 – в цепи шунтирующего диода $\frac{P_{ВС}}{P_{АС}}$; $P_{АС} = \frac{U^2}{24}$ – средняя мощность в системе импульсного питания при индуктивности $L = 0$

С увеличением индуктивности средняя мощность, поступающая к нагрузке от источника, уменьшается, а средняя мощность, поступающая от ЭДС самоиндукции, – увеличивается.

Для определения средних мощностей в абсолютных величинах по графикам рис. 5 необходимо значения из графиков умножить на величину $P_{АС}$. При $E = 100$ В и $R_H = 10$ Ом, $P_{АС} = 500$ В·А.

Средняя мощность в нагрузке складывается из суммы мощностей, поступающих от источника и от ЭДС самоиндукции.

Как это следует из результатов компьютерного моделирования рассматриваемой системы импульсного питания (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что ток нагрузки, а также мощность в системе импульсного питания складывается из суммы токов питающей линии и шунтирующего диода, также как и сумма мощности, поступающей в нагрузку от источника по питающей линии и от ЭДС самоиндукции, т.е. обеспечиваемой запасаемой в индуктивности реактивной энергией.

При параметрах нагрузки $R_n = 100$ м и $L_n = 0,1$ Гн до 43,3 % активной мощности обеспечивается за счет использования реактивной энергии.

Таблица 1

Энергетические параметры системы импульсного питания
при $R_n = 100$ м, $L_n = 0,1$ Гн, $m = 3,14$

Параметры системы		Источник (питающая линия)	Нагрузка	Шунти- рующий диод
Выпрямленное (постоянное) напряжение, В		44,14	44,14	44,14
Средний выпрямленный (постоянный ток)	А	2,414	4,415	2,001
	%	54,7	100	45,3
Средняя (активная) мощ- ность	ВА	106,55	194,87	88,32
	%	54,7	100	45,3

Представляет интерес сравнение такой системы импульсного питания с системой питания постоянным током.

С этой целью с применением компьютерных технологий исследованы упомянутые две схемы (рис. 6) при выходном напряжении схемы постоянного тока 43,128 В и практически равном ему среднему напряжению 13,138 В – схемы импульсного питания. В схемах включены амперметры и вольтметры постоянного тока (обозначения DC), переменного тока (обозначения AC), а также ваттметры активной мощности XWM1 – в питающей линии и XWM2 – в цепи нагрузки.

В системе питания постоянным током в качестве источника использовалась батарея элементов с выходным напряжением 43,1288, а в системе импульсного питания – источник переменного тока с эффективным напряжением 100 В. Среднее выпрямленное напряжение при этом оказалось равным 44,138 В, т.е. практически такого же уровня, как постоянное напряжение системы постоянного тока.

Измерялись величины постоянного напряжения и тока, а также переменное напряжение и ток, поскольку в цепи нагрузки системы импульсного питания в соответствии с осциллограммой (рис. 3), кроме постоянных (средних) напряжений и токов, имеет место значительной величины переменные составляющие напряжения и тока. Разумеется, что в системе питания постоянным током переменные составляющие тока и напряжения отсутствуют, но измерительные приборы включены для обеспечения одинаковых сопротивлений схем питания постоянным током и схемы импульсного питания.

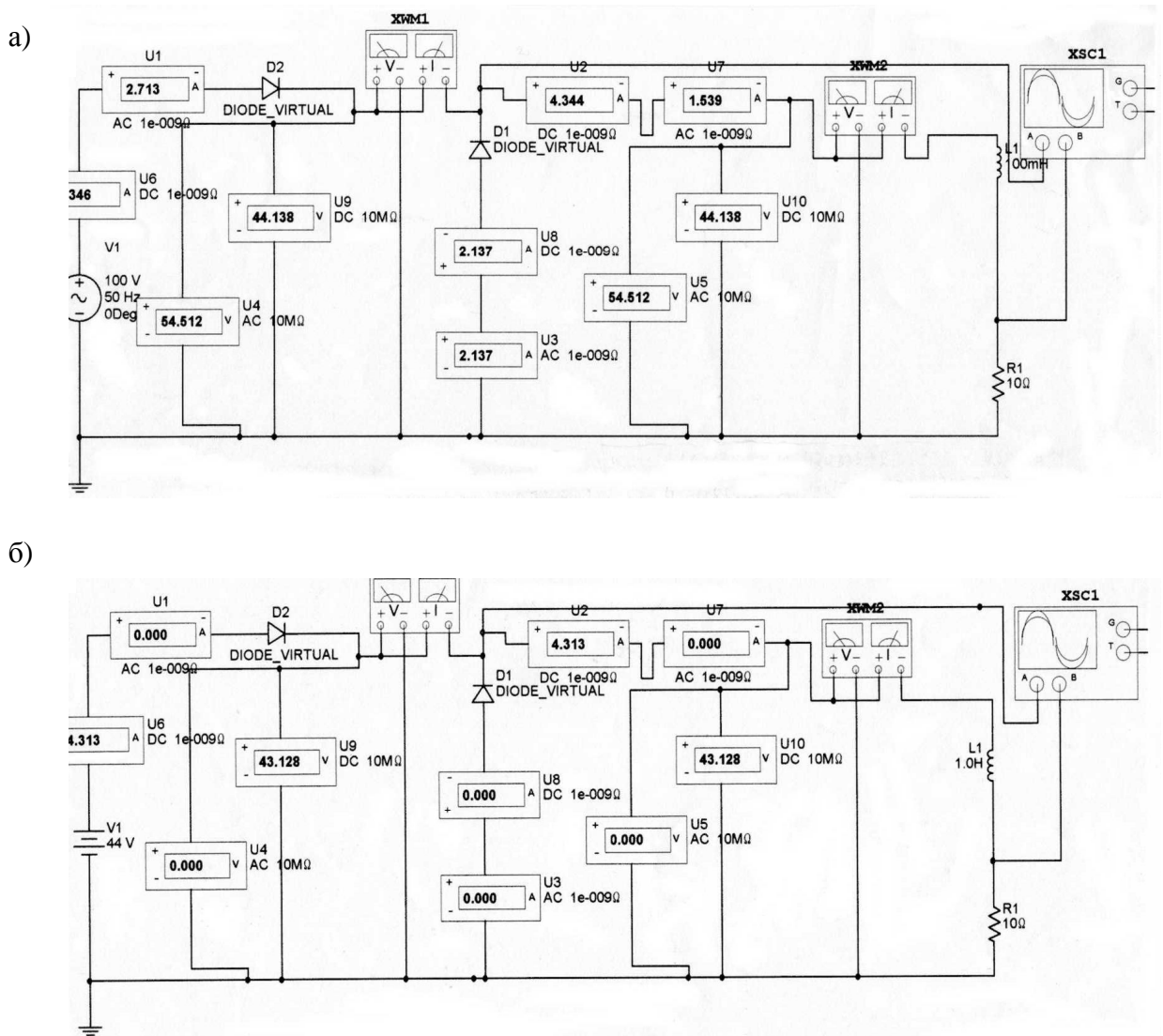


Рис. 6. Компьютерные схемы питания индуктивной нагрузки потребителя:
а) схема импульсного питания с однофазным выпрямлением тока;
б) схема питания постоянным током

Значения измеренных величин показаны на схемах (рис. 6).

Активная мощность в системе постоянного тока определялась как произведение измеренных величин постоянного тока и напряжения в такой системе. Активная мощность в нагрузке в системе импульсного питания определялась по формуле [4]:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi ,$$

где U_0 и I_0 – среднее выпрямленное напряжение и средний выпрямленный ток в цепи нагрузки;

U_I и I_I – переменное напряжение и переменный ток, измеренные в цепи нагрузки;

$\cos \varphi = \frac{R_H}{Z_H}$ – коэффициент мощности переменной составляющей, определяемый как отношение активного сопротивления цепи нагрузки к ее полному сопротивлению на частоте переменного тока (f):

$$Z = \sqrt{R_H^2 + X_H^2} = \sqrt{R_H^2 + 2\pi f L_H},$$

Эффективная (полная) мощность в линии и в нагрузке определялась согласно формулам, приведенным в учебниках по основам электротехники [4]:

$$S = U \cdot I,$$

где U – эффективное напряжение цепи, В;

I – эффективный ток цепи.

Эффективные значения токов и напряжений определялись по выражениям:

$$U = \sqrt{U_{II}^2 + U_{\sim}^2},$$

$$I = \sqrt{I_{II}^2 + I_{\sim}^2},$$

где U_{II} , U_{\sim} – постоянное (выпрямленное) и переменное напряжения;

I_{II} , I_{\sim} – постоянный (выпрямленный) и переменный токи цепи.

Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры систем импульсного питания и системы питания постоянного тока при одинаковых параметрах цепи нагрузки:

$$R_H = 10 \text{ Ом}, L_H = 0,1$$

Параметры систем питания	Система импульсного питания	Система постоянного тока
1	2	3
Постоянное напряжение источника и линии, В	44,1	44,0
Переменное напряжение источника и линии, В	54,5	0
Эффективное напряжение источника и линии, В	70,1	44,0
Постоянное напряжение нагрузки, В	44,1	44,0

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Переменное напряжение нагрузки, В	54,5	0
Эффективное напряжение нагрузки, В	70,1	44,0
Постоянный ток источника и линии, А	2,3	4,3
Переменный ток источника и линии, А	2,7	0
Эффективный ток источника и линии, А	3,6	4,3
Постоянный ток нагрузки, А	4,3	4,3
Переменный ток нагрузки, А	1,5	0
Эффективный ток нагрузки, А	4,6	4,3
Постоянный ток вентиля, А	2,1	0
Постоянная (выпрямленная) мощность источника и линии, ВА	101,4	189,8
Активная мощность в линии и источнике, ВА	214,6	189,8
Постоянная (выпрямленная) мощность нагрузки, ВА	189,6	189,8
Активная мощность в линии и источнике, ВА	146,0	189,8
Активная мощность в цепи вентиля, ВА	44,1	0
Эффективная (полная) мощность источника и линии, ВА	252,4	189,8
Эффективная (полная) мощность нагрузки, ВА	322,5	189,8

Анализ результатов компьютерного моделирования подтверждает ранее полученные расчетные данные о том, что в системе импульсного питания в нагрузке реализуется энергия от ЭДС самоиндукции, обеспечивая в цепи нагрузки среднее значение тока и мощности выше, чем ток и мощность, поступающие от источника по питающей линии. Причем, этот эффект при прочих равных условиях зависит от отношения индуктивного сопротивления цепи к её активному сопротивлению.

Сравнение системы импульсного питания с системой питания нагрузки постоянным током (табл. 3) свидетельствует о следующем. При одинаковом постоянном (выпрямленном) напряжении таких систем в нагрузке реализуется одинаковая постоянная мощность, а мощность в питающей линии при импульсном питании меньше мощности системы питания постоянным током (при принятых данных составляет 53%).

В табл. 3 принимались данные системы постоянного тока за 100%, данные системы импульсного питания определены в процентах по отношению к данным системы питания постоянным током.

Активная мощность, поступающая от источника по питающей линии, также ниже активной мощности в системе питания постоянным то-

ком, но активная и эффективная мощности в нагрузке выше, чем такие же мощности в системе питания постоянным током (составили соответственно 113% и 130 %).

Таблица 3

Сравнение энергетических параметров системы импульсного питания и системы питания постоянным током при $R_H = 10 \text{ Ом}$

Мощности систем питания	Система импульсного питания	Система постоянного тока
1	2	3
Постоянное (выпрямленное) напряжение системы, В	44,1	44
Постоянная (выпрямленная) мощность источника и линии, ВА	101,4 (53%)	189,8 (100%)
Постоянная (выпрямленная) мощность нагрузки, ВА	189,6 (100%)	189,8 (100%)
Активная мощность источника и линии, ВА	146,0 (77%)	189,8 (100%)
Активная мощность нагрузки, ВА	244,6 (113%)	189,8 (100%)
Активная мощность в цепи вентиля, ВА	44,1	0
Эффективная (полная) мощность источника и линии, ВА	252,4 (130%)	189,8 (100%)
Эффективная (полная) мощность нагрузки, ВА	322,5 (170%)	189,8 (100%)

Это позволяет при импульсном питании обеспечивать необходимые параметры потребителя при меньшем потреблении тока и энергии от источника и, следовательно, меньшие потери напряжения и мощности в питающей линии по сравнению с питанием постоянным током.

Однако при импульсном питании эффективное и максимальное напряжение источника выше, чем напряжение в системе питания постоянным током (вместо 44 В в системе питания постоянным током эффективное напряжение в системе импульсного питания составило 70,01 В).

В системе импульсного питания реактивная энергия, запасаемая в индуктивности нагрузки, превращается в полезную, т.е. активную мощность и энергию, о чем свидетельствует также увеличение коэффициента мощности ($\cos \varphi$) в цепи нагрузки по сравнению с коэффициентом

том мощности в питающей линии ($\cos \varphi = 0,665$ по сравнению с $\cos \varphi = 0,578$ – в питающей линии).

Заметим также, что при импульсном питании более благоприятно решаются вопросы отключения цепей аппаратами защиты от токов короткого замыкания, т.к. гашение электрической дуги или искрения в питающих линиях происходит при наступлении первой паузы тока источника.

Это особенно важно для предотвращения пожаров от коротких замыканий в кабелях и обеспечения искробезопасности в питающих линиях индуктивной нагрузки.

ВЫВОДЫ

На основании результатов исследований импульсной системы питания с однофазным выпрямлением тока установлено следующее

При питании потребителей постоянного тока импульсным током представляется возможным полезное использование реактивной энергии и переменной составляющей выпрямленного тока для увеличения активной мощности потребителей. Для этого на время паузы между импульсами тока необходимо производить электрическое запирающее питание питающей линии или источника, а саму нагрузку шунтировать вентилем, включенным встречно току импульса.

Показано, что эффективность импульсного питания проявляется в обеспечении необходимой мощности потребителя при меньшем токе и мощности источника питания или в увеличении мощности потребителя при одинаковом токе в сравнении с питанием постоянным током.

Применение систем импульсного питания для потребителей постоянного тока позволяет уменьшить потери электроэнергии в питающих линиях или при одинаковых потерях повысить мощность потребителя, что создает предпосылки в экономии электроэнергии при импульсном питании по сравнению с питанием постоянным током.

Перспективным является применение импульсного питания потребителей постоянного тока, имеющих индуктивное сопротивление больше активного, в частности для рудничных контактных электровозов и искробезопасных систем рудничного взрывозащищенного электрооборудования.

Полученные результаты предназначены для организаций и лиц, занимающихся вопросами энергосбережения и безопасности применения электроустановок, особенно в шахтах, опасных по газу, или во взрывоопасных производствах различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванчук Б. Н. Электроприводы с полупроводниковым управлением / Б. Н. Иванчук, Р. А. Липман, Б. Я. Рувинов. – М.; Л.: Энергия, 1961. – 96 с.
2. Скобелев В. Г. Двигатели пульсирующего тока / В. Г. Скобелев. – М.: Энергия, 1970. – 231 с.
3. Колосюк В. П. Импульсное питание электроустановок: Энергосбережение и безопасность / В. П. Колосюк, А. В. Колосюк, В. В. Дорофиев. – Донецк: ВИК, 2002. – 259 с.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1962. – 792 с.

Получено: 5.12.2012 г.

Розглянуто закономірності основних параметрів системи імпульсного живлення з однофазним випрямленням перемінного струму. Показано, що використовуючи реактивну енергію системи імпульсного живлення, можна збільшити корисну потужність споживача й зменшити споживану потужність від джерела.

Ключові слова: імпульсне живлення, лінія, споживач, навантаження, активний опір, індуктивність, струм, напруга, потужність, іскробезпека, електрична дуга.

The regularities of basic parameters of pulse energization system with single-phase rectification of alternate current have been considered. It has been shown that by using jet power of pulse energization system it is possible to increase the useful capacity of the consumer and to decrease power consumption from the source.

Keywords: pulse energization, line, consumer, load, active resistance, inductance, current, voltage, capacity, intrinsic safety, electrical arc.