УДК 621.3.11.1.016.25

К ВОПРОСУ О КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Докт. техн. наук, проф. САЕНКО Ю. Л.

Приазовский государственный технический университет

В линейных цепях синусоидального тока компенсация реактивной мощности заключается в подключении параллельно или последовательно нагрузке накопителя электромагнитной энергии. В качестве последнего в зависимости от знака реактивной мощности может быть использована емкость либо индуктивность.

Для полной компенсации мощность компенсирующего устройства $Q_к$ должна быть равна реактивной мощности нагрузки $Q_н$ и противоположна по знаку

$$Q_к = -Q_н = -UI \sin \varphi, \tag{1}$$

где U – действующее значение напряжения на нагрузке; I – то же тока нагрузки; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током нагрузки.

Как известно [1, 2], при несинусоидальных режимах в электрических цепях с нелинейными нагрузками традиционный подход к определению реактивной мощности (1) оказывается неприемлемым, соответственно и существующие методы компенсации, основанные на этом подходе, становятся некорректными. Дело в том, что при несинусоидальных режимах интегральное значение реактивной мощности Q не позволяет в полной мере описать процессы обмена электромагнитной энергией между источником и нагрузкой. При анализе электромагнитных процессов в нелинейных цепях несинусоидального тока целесообразно применять понятие мгновенной реактивной мощности, аналогично тому, как используются мгновенные токи и напряжения (или их спектры), а не их действующие значения при расчетах таких электрических цепей.

При нелинейных нагрузках (например, преобразовательных установок) помимо электромагнитной реактивной мощности, обусловленной наличием накопителей электромагнитной энергии (емкости и /или индуктивности), может иметь место вторая составляющая реактивной мощности – мощность искажения (мощность сдвига фаз), связанная с искажением формы тока и напряжения [3]. Однако при решении вопроса компенсации реактивной мощности разделение ее на эти две составляющие представляется нецелесообразным, поскольку внешнее проявление составляющих реактивной мощности одинаково. Несмотря на принципиально разную физическую природу происхождения, реактивная мощность может быть скомпенсирована электромагнитной реактивной мощностью и наоборот, что довольно широко используется на практике при компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразовательными установками, батареями конденсаторов или синхронными компенсаторами.

При полной компенсации реактивной мощности и высших гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой, ток источника $i_и(t)$ должен соответствовать подключению линейной активной неизменяющейся во времени нагрузки, т. е. нелинейная нагрузка вместе с компенсирующим устройством заменяется эквивалентным активным сопротивлением R (рис. 1).

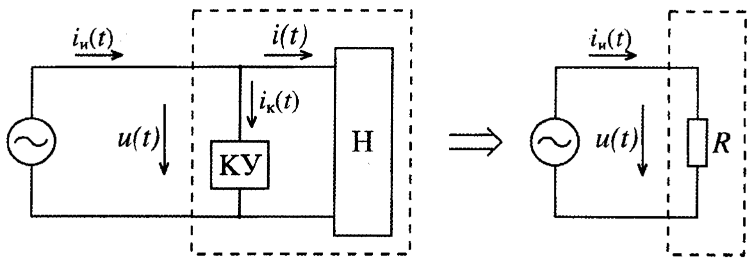

Рис. 1. Принцип компенсации реактивной мощности нелинейной нагрузки

Важным условием подобного эквивалентирования является равенство активной мощности нелинейной нагрузки и активного сопротивления R. Таким образом, для определения мгновенной реактивной мощности $q(t)$, которая может быть полностью скомпенсирована, необходимо от мгновенной мощности нагрузки

$$p(t) = u(t)i(t) \tag{2}$$

отнять мгновенную мощность активного сопротивления

$$q(t) = p(t) - p_r(t) = u(t)i(t) - \frac{u^2(t)}{R}. \tag{3}$$

Величину активного сопротивления R можно найти из условия равенства активной мощности нагрузки и активной мощности, потребляемой этим сопротивлением:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{u^2(t)}{R}dt; \tag{4}$$

откуда

$$R = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)dt}{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} = \frac{P}{U^2}, \tag{5}$$

где U – действующее значение питающего напряжения.

Таким образом, мгновенная реактивная мощность нагрузки

$$q(t) = u(t)i(t) - \frac{P}{U^2}u^2(t). \tag{6}$$

Для полной компенсации реактивной мощности необходимо, чтобы мгновенная реактивная мощность компенсирующего устройства $q_к(t)$ в точности соответствовала мгновенной мощности нагрузки $q(t)$ и находилась с ней в противофазе

$$q_к(t) = -q(t) = \frac{P}{U^2}u^2(t) - u(t)i(t). \tag{7}$$

Докажем, что в этом случае потери энергии в питающей сети будут минимальны. Для этого найдем функцию $i(t)$, при которой функционал

$$S(i(t)) = \int_0^T i^2(t)dt \tag{8}$$

принимает минимальное значение, если

$$\frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)dt = P, \tag{9}$$

а $u(t)$ – заданная периодическая функция, для которой существует интеграл

$$\int_0^T u^2(t)dt < \infty. \tag{10}$$

Для решения поставленной задачи введем новую неизвестную функцию

$$z(t) = \int_0^t u(\tau)i(\tau)d\tau. \tag{11}$$

В этом случае:

$$z(0) = 0; \quad z(T) = PT. \tag{12}$$

Дифференцируя $z(t)$ по t, получим

$$z'(t) = u(t)i(t). \tag{13}$$

Тогда интегральная связь (9) может быть представлена в виде дифференциальной связи

$$u(t)i(t) - z'(t) = 0. \tag{14}$$

Непосредственному исследованию подвергнем вспомогательный функционал [4]

$$S^* = \int_0^T (i^2(t) + \lambda(t)[u(t)i(t) - z'(t)])dt = \int_0^T F^* dt, \tag{15}$$

где

$$F^* = i^2(t) + \lambda(t)[u(t)i(t) - z'(t)]. \tag{16}$$

Функционал (15) зависит от выбора функций $i(t)$ и $z(t)$, поэтому составим для него два уравнения Эйлера:

$$F_i^* - \frac{dF_{i'}^*}{dt} = 0; \tag{17}$$

$$F_z^* - \frac{dF_{z'}^*}{dt} = 0, \tag{18}$$

где

$$F_i^* = \frac{\partial F^*}{\partial i} = 2i(t) + \lambda(t)u(t); \tag{19}$$

$$F_{i'}^* = \frac{\partial F^*}{\partial i'} = 0; \tag{20}$$

$$F_z^* = \frac{\partial F^*}{\partial z} = 0; \tag{21}$$

$$F_{z'}^* = \frac{\partial F^*}{\partial z'} = -\lambda(t). \tag{22}$$

Подставляя выражения (19)–(22) в (17) и (18), получим:

$$2i(t) + \lambda(t)u(t) = 0; \tag{23}$$

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = 0. \tag{24}$$

Из последнего уравнения следует

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const},$$

что позволяет вновь обратиться к вспомогательному функционалу S^* и заметить, что первое из уравнений Эйлера для этого функционала совпадает с уравнением Эйлера для более простого функционала

$$\overline{S} = \int_0^T \left(i^2(t) + \lambda u(t) i(t)\right) dt = \int_0^T \overline{F} dt, \qquad (25)$$

где

$$\overline{F} = i^2(t) + \lambda u(t) i(t) \qquad (26)$$

и $\lambda = \text{const}$.

Подынтегральная функция $\overline{F}$ зависит только от i и t, поэтому уравнение Эйлера имеет вид

$$\overline{F}_i = 0.$$

Следовательно,

$$\overline{F}_i = \frac{\partial \overline{F}}{\partial i} = 2i(t) + \lambda u(t) = 0,$$

откуда

$$i(t) = -\frac{\lambda}{2} u(t). \qquad (27)$$

Постоянную λ можно найти из условия (9)

$$\frac{1}{T} \int_0^T u(t)(-\frac{\lambda}{2}) u(t) dt = P, \qquad (28)$$

откуда

$$\lambda = -\frac{2P}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \qquad (29)$$

Подставив это выражение в (27), получим

$$i(t) = \frac{Pu(t)}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{P}{U^2} u^2(t) = \frac{1}{R} u(t). \qquad (30)$$

Достаточным условием существования минимума функционала (15) является положительность на интервале [0;T] его второй вариации, когда первая вариация равна нулю, т. е. должен быть положительным интеграл [4]

$$G = \int_0^T \left(\eta^2 F_{ii}^* + 2\eta\eta' F_{ii'}^* + (\eta')^2 F_{i'i'}^*\right) dt, \qquad (31)$$

где η – непрерывно дифференцируемая функция и $\eta(0) = \eta(T) = 0$.

Так как

$$F_{ii}^* = \frac{\partial F_i^*}{\partial i} = 2; \qquad (32)$$

$$F^*_{ii'} = \frac{\partial F^*_{i'}}{\partial i} = 0; \tag{33}$$

$$F^*_{i'i'} = \frac{\partial F^*_{i'}}{\partial i'} = 0, \tag{34}$$

значит

$$G = 2\int_0^T \eta^2 dt > 0, \tag{35}$$

т. е. функция (30) обеспечивает минимум функционала (8) при условиях (9) и (10).

Таким образом, действительно потери в питающей сети будут минимальны при эквивалентировании нелинейной нагрузки и компенсирующего устройства активным неизменным во времени сопротивлением

$$R = \frac{U^2}{P}. \tag{36}$$

Рассмотрим применение понятия мгновенной реактивной мощности к линейным цепям синусоидального тока. Если напряжение и ток нагрузки определяются выражениями:

$$u(t) = U_m \sin \omega t; \tag{37}$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi), \tag{38}$$

то мгновенная реактивная мощность, потребляемая этой нагрузкой, примет вид

$$q(t) = U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t - \varphi) - \frac{UI\cos\varphi}{U^2} U_m^2 \sin^2 \omega t =$$

$$= UI\left[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi) - \cos\varphi(1 - \cos 2\omega t)\right] =$$

$$= -UI \sin\varphi \sin 2\omega t = -Q \sin 2\omega t. \tag{39}$$

На рис. 2 и 3 приведены кривые напряжения, тока и мгновенной мощности соответственно для индуктивной и емкостной нагрузок.

Как следует из анализа (39) и кривых, представленных на рис. 2, 3, при синусоидальных режимах в линейных цепях мгновенная реактивная мощность определяется только значением и знаком реактивной мощности Q в традиционной ее интерпретации. Значение реактивной мощности Q равно амплитуде мгновенной реактивной мощности $q(t)$. Для определения знака реактивной мощности нагрузки необходимо задать начальную фазу питающего напряжения $u(t)$, так как знак реактивной мощности опреде-

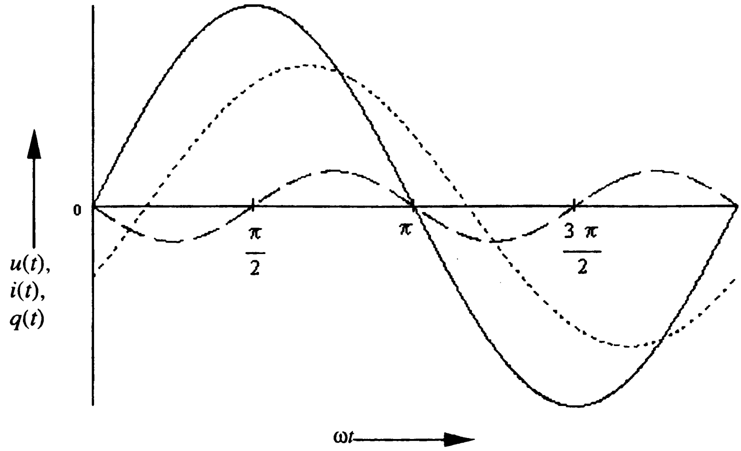

Рис. 2. Кривые напряжения, тока, мгновенной реактивной мощности индуктивной нагрузки: ——— $u(t)$; - - - - $i(t)$; — — — $q(t)$

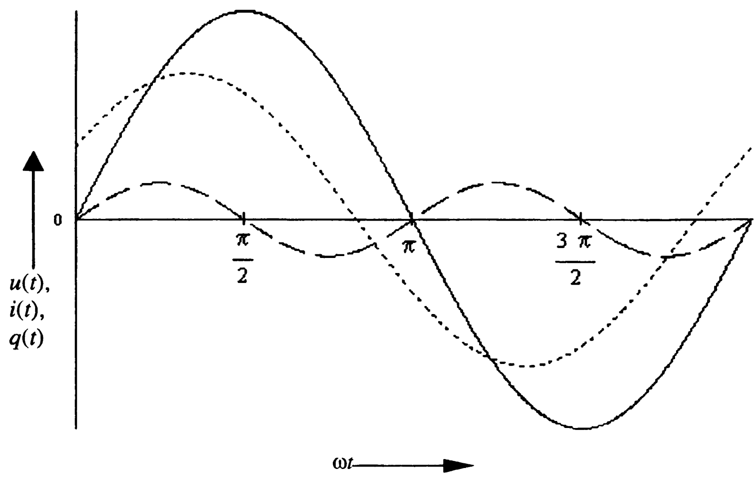

Рис. 3. Кривые напряжения, тока, мгновенной реактивной мощности емкостной нагрузки (обозначения – на рис. 2)

ляется сдвигом фаз между напряжением $u(t)$ и мгновенной реактивной мощностью $q(t)$. Учитывая, что мгновенная реактивная мощность $q(t)$ имеет в два раза большую частоту изменения, чем питающее напряжение, говорить о сдвиге фаз между $q(t)$ и $u(t)$ можно только для какого-то фиксированного момента времени. В связи с этим примем, что при $t = 0$ фаза питающего напряжения равна нулю. Это обеспечивается выполнением условий:

$$u(0) = 0; \quad u'(0) > 0. \tag{40}$$

В данном случае нагрузка потребляет реактивную мощность (имеет индуктивный характер), если фаза мгновенной реактивной мощности $q(t)$ равна π, т. е.:

$$q(0) = 0; \quad q'(0) < 0, \tag{41}$$

и генерирует реактивную мощность (имеет емкостный характер), если фаза мгновенной реактивной мощности $q(t)$ равна 0, т. е.:

$$q(0)=0; \quad q'(0)>0. \tag{42}$$

При несинусоидальных режимах в нелинейных электрических цепях обойтись знанием только амплитуды Q и знака мгновенной реактивной мощности невозможно, так как зависимость $q(t)$ перестает быть синусоидальной, и, не зная характер изменения $q(t)$, нельзя обеспечить полную компенсацию реактивной мощности.

В общем случае условие полной компенсации реактивной мощности (7) может быть выполнено при использовании активных либо пассивных фильтров, имеющих в своем составе бесконечное число элементов (индуктивностей и емкостей). В случае применения реальных фильтро-компенсирующих устройств количественную оценку их мощности можно получить на основании метода наименьших квадратов, т. е. когда принимает минимальное значение интеграл

$$\int_0^T \left(q(t)+q_{\text{к}}(t)\right)^2 dt \to \min. \tag{43}$$

Необходимо отметить, что величина реактивной мощности Q нелинейной нагрузки в этом случае будет определяться не только характером изменения мгновенной реактивной мощности $q(t)$, но и типом компенсирующего устройства.

В качестве примера рассмотрим определение мощности батареи конденсаторов, применяемой для компенсации нелинейной нагрузки. Мгновенная реактивная мощность батареи конденсаторов

$$q_{\text{к}}(t)=u(t)i_{\text{к}}(t)=Cu(t)\frac{du(t)}{dt}. \tag{44}$$

Подставляя это выражение в (43) и приравнивая его производную по емкости к нулю, получим

$$\frac{d}{dC}\int_0^T \left(q(t)+Cu(t)\frac{du(t)}{dt}\right)^2 dt=0, \tag{45}$$

откуда после дифференцирования:

$$2\int_0^T q(t)u(t)\frac{du(t)}{dt}dt+2C\int_0^T \left(u(t)\frac{du(t)}{dt}\right)^2 dt=0; \tag{46}$$

$$C=-\frac{\int\limits_0^T q(t)u(t)\frac{du(t)}{dt}dt}{\int\limits_0^T\left(u(t)\frac{du(t)}{dt}\right)^2dt}=\frac{\int\limits_0^T\left(\frac{P}{U^2}u^2(t)-u(t)i(t)\right)u(t)\frac{du(t)}{dt}dt}{\int\limits_0^T\left(u(t)\frac{du(t)}{dt}\right)^2dt}. \qquad (47)$$

Положительность второй производной

$$\frac{d^2}{dC^2}\int\limits_0^T\left(q(t)+Cu(t)\frac{du(t)}{dt}\right)^2dt=2\int\limits_0^T\left(u(t)\frac{du(t)}{dt}\right)^2dt>0 \qquad (48)$$

говорит о достаточности условия (47) для минимума функции (43).

Так как мощность батареи конденсаторов определяется выражением

$$Q=\omega CU^2, \qquad (49)$$

оценка реактивной мощности нелинейной нагрузки (для выбора мощности батареи конденсаторов) будет иметь вид

$$Q=\frac{\omega\int\limits_0^T\left(Pu(t)-U^2i(t)\right)u^2(t)\frac{du(t)}{dt}dt}{\int\limits_0^T\left(u(t)\frac{du(t)}{dt}\right)^2dt}. \qquad (50)$$

Еще раз подчеркнем, что интегральное значение реактивной мощности Q нелинейной нагрузки может быть определено только в контексте решаемой задачи. Например, в случае решения задачи компенсации реактивной мощности оно будет зависеть от типа (структуры) компенсирующего устройства.

Определим для примера реактивную мощность по выражению (50) линейной нагрузки, напряжение и ток которой определяются по формулам (37) и (38):

$$Q=\frac{\omega\int\limits_0^T\left[UI\cos\varphi U_m\sin\omega t-U^2I_m\sin(\omega t-\varphi)\right]U_m^2\sin^2\omega tU_m\omega\cos\omega tdt}{\int\limits_0^T\left(U_m\sin\omega tU_m\omega\cos\omega t\right)^2dt}=$$

$$=\frac{\omega\pi U^5I\sin\varphi}{\omega\pi U^4}=UI\sin\varphi. \qquad (51)$$

Таким образом, для линейных цепей синусоидального тока величина реактивной мощности, определенная по выражению (50), совпадает с ее общеизвестным значением.

Рассмотрим теперь компенсацию реактивной мощности нелинейной нагрузки с учетом сопротивления источника питания $R_и$ (рис. 4). Наличие сопротивления питающей сети приведет к изменению напряжения на нагрузке, а, следовательно, ее тока и активной мощности после подключения компенсирующего устройства.

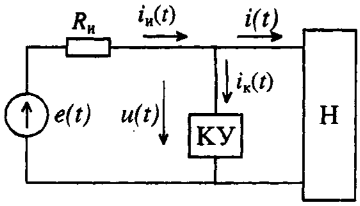

Рис. 4. Компенсация реактивной мощности с учетом сопротивления источника питания

Будем считать, что токи нагрузки $i(t)$ и компенсирующего устройства $i_к(t)$ являются функцией напряжения $u(t)$:

$$i(t) = i[u(t)]; \tag{52}$$

$$i_к(t) = i_к[u(t)], \tag{53}$$

тогда напряжение на нагрузке

$$u(t) = e(t) - R_и i[u(t)] - R_и i_к[u(t)], \tag{54}$$

а с учетом выражения (7) мгновенная реактивная мощность $q_к(t)$ и ток компенсирующего устройства:

$$q_к(t) = u(t) i_к[u(t)]; \tag{55}$$

$$i_к[u(t)] = \frac{P}{U^2} u(t) - i[u(t)]. \tag{56}$$

Как было отмечено выше, активная мощность нагрузки P и действующее значение напряжения U будут зависеть от режима работы компенсирующего устройства:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T \left(e(t) - R_и i[u(t)] - R_и i_к[u(t)]\right)[u(t)]dt; \tag{57}$$

$$U^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \left(e(t) - R_и i[u(t)] - R_и i_к[u(t)]\right)^2 dt. \tag{58}$$

Совместное решение уравнений (54)–(58) дает возможность определить мгновенную реактивную мощность компенсирующего устройства, обусловливающую полную компенсацию реактивной мощности нелинейной нагрузки.

В случае, когда нелинейная нагрузка представляет собой коммутируемые линейные элементы (например, вентильные преобразователи), т. е. когда ток нагрузки пропорционален напряжению

$$i[ku(t)] = ki[u(t)], \tag{59}$$

имеется возможность получить обозримое решение поставленной задачи.

Подставив выражение (56) в (54), получим

$$u(t) = e(t) - \frac{R_и P}{U^2} u(t), \tag{60}$$

откуда:

$$u(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_и P}{U^2}} e(t); \tag{61}$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} = \frac{E}{\left(1 + \frac{R_и P}{U^2}\right)} \tag{62}$$

или

$$EU = U^2 + R_и P, \tag{63}$$

где E – действующее значение источника ЭДС $e(t)$.

Активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)i[u(t)]dt = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_и P}{U^2}\right)^2} \frac{1}{T}\int_0^T e(t)i[e(t)]dt = \frac{P_{(R_и = 0)}}{\left(1 + \frac{R_и P}{U^2}\right)^2}, \tag{64}$$

где $P_{(R_и = 0)}$ – активная мощность, потребляемая нагрузкой при идеальном источнике питания $(R_и = 0)$; $i[e(t)]$ – ток нагрузки при подключении к идеальному источнику питания.

Решая уравнение (64) относительно P, получим

$$P = \frac{U^2}{E^2} P_{(R_и = 0)} \tag{65}$$

или

$$\frac{P}{U^2} = \frac{P_{(R_и = 0)}}{E^2}. \tag{66}$$

С учетом последнего выражения формулы (61) и (59) примут вид:

$$u(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_и P_{(R_и = 0)}}{E^2}} e(t); \tag{67}$$

$$i(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_и P_{(R_и=0)}}{E^2}} i[e(t)]. \quad (68)$$

Подставляя выражения (67), (68) в (55), (56), получим:

$$i_к(t) = \frac{P_{(R_и=0)}}{E^2} \frac{1}{1 + \frac{R_и P_{(R_и=0)}}{E^2}} e(t) - \frac{1}{1 + \frac{R_и P_{(R_и=0)}}{E^2}} i[e(t)] = \frac{P_{(R_и=0)} e(t) - E^2 i[e(t)]}{E^2 + R_и P_{(R_и=0)}}; \quad (69)$$

$$q_к(t) = \frac{E^2 e(t) \left(P_{(R_и=0)} e(t) - E^2 i[e(t)]\right)}{\left(E^2 + R_и P_{(R_и=0)}\right)^2}. \quad (70)$$

В частном случае, когда $R_и = 0$, получим известное выражение (7)

$$q_к(t) = \frac{P}{E^2} e^2(t) - e(t) i(t). \quad (71)$$

В качестве примера рассмотрим определение закона изменения мгновенной реактивной мощности компенсирующего устройства, если нагрузка представляет собой однополупериодный выпрямитель с активной нагрузкой $R_н$ (рис. 5).

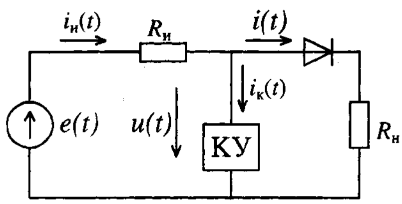

Рис. 5. Схема компенсации реактивной мощности однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой

Активная мощность нагрузки при питании от идеального источника

$$P_{(R_и=0)} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} E_m \sin \omega t \frac{E_m}{R_н} \sin \omega t dt = \frac{E^2}{2R_н}. \quad (72)$$

Определим выражения, описывающие режим работы рассматриваемой схемы для интервалов – [0;π] и [π;2π], т. е. для интервалов открытого и закрытого состояний вентиля.

Интервал [0;π]:

$$e(t) = E_m \sin \omega t; \quad (73)$$

$$i[e(t)] = \frac{E_m}{R_н} \sin \omega t; \quad (74)$$

$$i_{\text{к}}(t)=\frac{\frac{E^2}{2R_{\text{н}}}E_m\sin\omega t-E^2\frac{E_m}{R_{\text{н}}}\sin\omega t}{E^2+E^2\frac{R_{\text{и}}}{2R_{\text{н}}}}=-\frac{E_m}{2R_{\text{н}}+R_{\text{и}}}\sin\omega t; \qquad (75)$$

$$q_{\text{к}}(t)=-\frac{2R_{\text{н}}E_m^2}{\left(2R_{\text{н}}+R_{\text{л}}\right)^2}\sin\,\omega t. \qquad (76)$$

Интервал $[\pi;2\pi]$.

ЭДС этого источника для данного интервала останется без изменения (73), а ток нагрузки

$$i[e(t)]=0, \qquad (77)$$

поэтому:

$$i_{\text{к}}(t)=\frac{\frac{E^2}{2R_{\text{н}}}E_m\sin\omega t-0}{E^2+E^2\frac{R_{\text{и}}}{2R_{\text{н}}}}=\frac{E_m}{2R_{\text{н}}+R_{\text{и}}}\sin\omega t; \qquad (78)$$

$$q_{\text{к}}(t)=\frac{2R_{\text{н}}E_m^2}{(2R_{\text{н}}+R_{\text{л}})^2}\sin^2\omega t. \qquad (79)$$

Кривые изменения напряжения $u(t)$, тока нагрузки $i(t)$, мгновенной реактивной мощности $q_{\text{к}}(t)$ и тока $i_{\text{к}}(t)$ компенсирующего устройства приведены на рис. 6.

Рассчитаем ток источника $i_{\text{к}}(t)$, если мгновенная реактивная мощность компенсирующего устройства определяется выражениями (76) и (79).

На интервале $[0;\pi]$

$$i_{\text{и}}(t)=i_{\text{н}}(t)+i_{\text{к}}(t)=\frac{2E_m}{2R_{\text{н}}+R_{\text{и}}}\sin\omega t-\frac{E_m}{2R_{\text{н}}+R_{\text{и}}}\sin\omega t=\frac{E_m}{2R_{\text{н}}+R_{\text{и}}}\sin\omega t. \qquad (80)$$

На интервале $[\pi;2\pi]$

$$i_{\text{и}}(t)=i_{\text{к}}(t)=\frac{E_m}{2R_{\text{н}}+R_{\text{и}}}\sin\,\omega t. \qquad (81)$$

Таким образом, компенсация реактивной мощности в соответствии с выражениями (76) и (79) обеспечивает синусоидальную форму тока источника (рис. 7).

В заключение найдем потери мощности в питающей сети и мощность, выделяемую в нагрузке, после установки компенсирующего устройства.

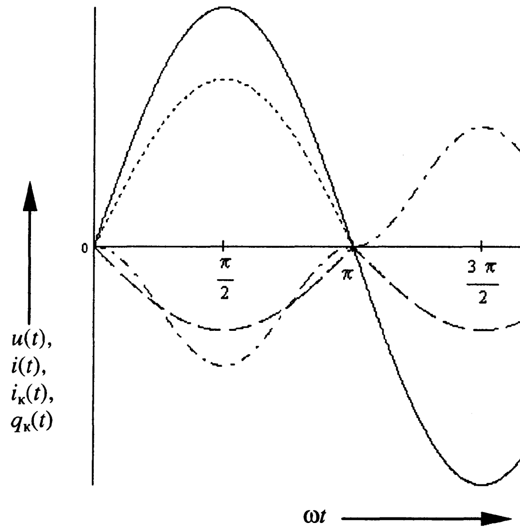

Рис. 6. Графики $u(t)$, $i(t)$, $i_к(t)$, $q_к(t)$ однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой: ——— $u(t)$; - - - - - $i(t)$; — — — $i_к(t)$; – · – · – $q_к(t)$

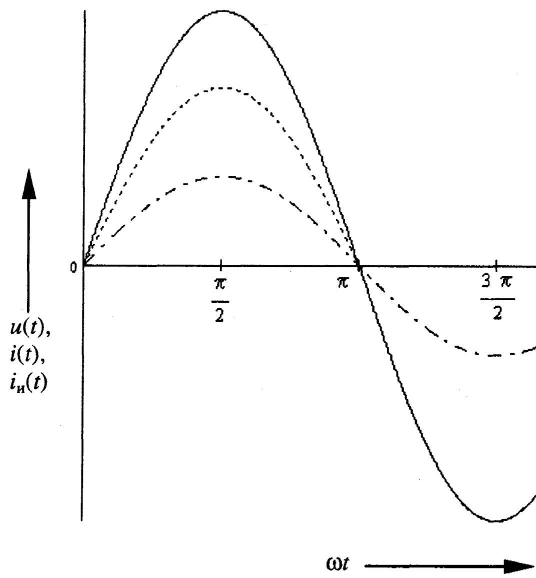

Рис. 7. Графики $u(t)$, $i(t)$, $i_и(t)$ однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой: ——— $u(t)$; - - - - - $i(t)$; – · – · – $i_и(t)$

Потери в питающей сети

$$\Delta P = I^2 R_и = \frac{R_и E^2}{(2R_н + R_и)^2}; \tag{82}$$

активная мощность, отдаваемая источником:

$$P_и = EI = \frac{E^2}{2R_н + R_и}; \tag{83}$$

мощность нагрузки

$$P = P_и - \Delta P = \frac{E^2}{2R_н + R_и} - \frac{R_и E^2}{(2R_н + R_и)^2} = \frac{2R_н E^2}{(2R_н + R_и)^2}. \qquad (84)$$

В случае идеального источника ($R_и = 0$) это выражение преобразуется к виду (72).

ЛИТЕРАТУРА

1. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др. – Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.

2. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Реактивная мощность в задачах электроэнергетики // Электричество. – 1987. – № 2.

3. Саенко Ю. Л. Реактивная мощность в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками // Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Elektryka, z. 123. – Gliwice, 1991. – 118 с.

4. Высшая математика: Специальные главы / П. И. Чинаев и др. – Киев: Вища школа, 1981. – 368 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 5.12.2001

УДК 621.316.176

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАРИФНЫХ ЗОН СУТОК ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Канд. техн. наук, доц. ПРОКОПЧИК В. В., ст. преп. СЫЧЕВ А. В.

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

В основе традиционной практики применения и разработки тарифов на электроэнергию лежит принцип возмещения энергосистеме (ЭС) затрат на производство, транспорт и распределение электроэнергии с учетом плановых отчислений и накоплений. Единство процессов производства и потребления электроэнергии обусловливает взаимную зависимость технико-экономических показателей производителей и потребителей электроэнергии от согласования режимов их работы и режимного взаимодействия в процессе электропотребления. Игнорирование интересов и возможностей одной из сторон приводит к конфликтам как коммерческого, так и технического характера – неплатежам, штрафным санкциям, повышению себестоимости продукции, отключениям и т. д. Переход к рыночным отноше-