

Расчет обратноходового преобразователя напряжения в установившемся режиме

Ненахов С.М.,
генеральный директор ИЦ «Апельсинн»
E-mail: info@apelsinn.ru

Опубликованная в предыдущих номерах журнала статья [1], посвященная анализу процессу запуска обратноходового преобразователя напряжения (ОПН), неожиданно вызвала у читателей живой интерес к расчету последнего в установившемся (статическом) режиме работы. В своей многолетней деятельности в области силовой электроники автор сталкивался с различными подходами к решению этой задачи. И все они, безусловно, имеют право на существование, если в итоге дают результаты, достаточно хорошо подтверждающиеся на практике.

Излагаемая ниже методика автора (хотя ничего такого, что он мог бы приписать лично себе, в ней нет), этому критерию, можно сказать, отвечает, правда, с той оговоркой, что речь идет (и пойдет) о довольно низких частотах преобразования – порядка 100 кГц, типичных для сетевых преобразователей.

Упрощенная электрическая схема силовой части одноконтурного ОПН показана на рис.1 ($R_{дт}$ – сопротивление датчика тока, R_T и R_d – соответственно сопротивления транзистора VT1 и диода VD1 в открытом состоянии, а R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток I и II трансформатора T1).

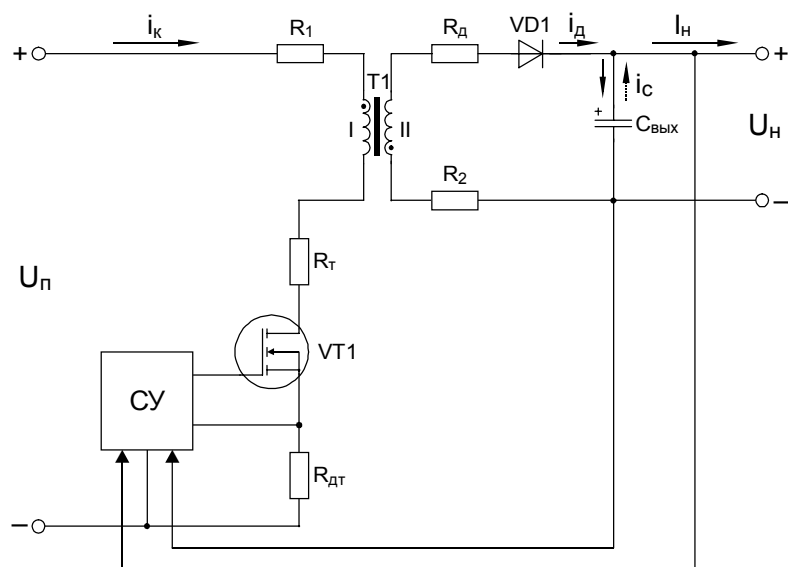


Рис. 1.

Принцип действия такого преобразователя заключается в накоплении энергии в трансформаторе-дросселе T1 во время открытого состояния транзистора VT1 (прямой ход) и последующей передаче ее в нагрузку во время запертого состояния транзистора VT1 (обратный ход) через открывающийся диод VD1. Если к моменту очередного включения транзистора еще не вся энергия из трансформатора передана (на обратном ходу) в нагрузку, то говорят о непрерывном режиме работы преобразователя, имея в виду непрерывность магнитного потока в сердечнике трансформатора в течение всего периода переключений. Если же к моменту включения транзистора вся накопленная на прямом ходу энергия передается из трансформатора в нагрузку, то такой режим работы называют прерывным. В последнем случае транзистор включается на полностью «размагниченный» трансформатор, в сердечнике которого магнитный поток отсутствует.

Из-за ограниченности статьи по объему рассмотрим только прерывный режим работы на фиксированной частоте. Идеализированные эпюры напряжений и токов для этого случая показаны на рис.2.

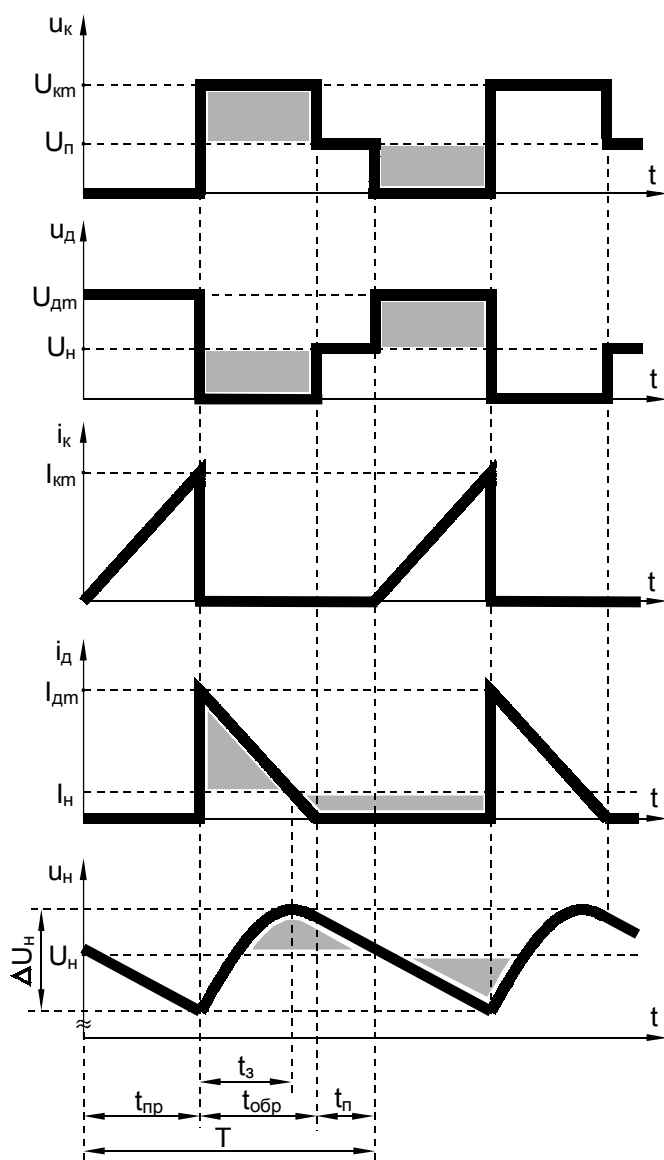


Рис. 2.

Пренебрегая падениями напряжений на активных сопротивлениях обмоток и полупроводниковых приборов, запишем очевидные соотношения.

1. Амплитуда напряжения на коллекторе (стоке) запертого транзистора VT1

$$U_{км} = U_n + \frac{U_n + U_{\partial 0}}{n},$$

где $n = \frac{w_2}{w_1}$ - коэффициент трансформации (w_1 и w_2 - количества витков обмоток I и II соответственно);

U_n и U_n - соответственно напряжения питания (входное) и на нагрузке (выходное);

$U_{\partial 0}$ - падение напряжения на открытом диоде VD1.

Отсюда

$$n = \frac{U_{км \max} - U_{н \max}}{U_n + U_{\partial 0}}$$

и амплитуда напряжения на запертом диоде

$$U_{\partial \max} = nU_{н \max} + U_n.$$

При выбранном транзисторе и заданном напряжении $U_{км\max}$ последнее выражение является условием для выбора диода. Справедливо и наоборот.

2. Длительности прямого и обратного ходов (t_{np} и $t_{обп}$) связаны между собой, с одной стороны, равенством соответствующих вольт-секундных интегралов

$$nU_n t_{np} = (U_n + U_{\partial 0}) t_{обп},$$

а с другой стороны – очевидным соотношением

$$t_{np} + t_{обп} + t_n = T,$$

где T - период переключений элементов преобразователя;

t_n - длительность паузы.

Отсюда

$$t_{обп} = \frac{T - t_{n\min}}{1 + \frac{U_n + U_{\partial 0}}{nU_n}} \text{ и } t_{np} = \frac{U_n + U_{\partial 0}}{nU_n} t_{обп}.$$

3. Мощность в нагрузке

$$P_n = \frac{1}{T} \int_0^T U_n i_{\partial}(t) dt = \frac{U_n I_{\partial m}}{T} \int_0^{t_{обп}} \left(1 - \frac{t}{t_{обп}}\right) dt = \frac{U_n I_{\partial m} t_{обп}}{2T}.$$

Отсюда – амплитуда тока через диод

$$I_{\partial m} = \frac{2TP_n}{U_n t_{обп}}.$$

4. Далее, казалось бы, можно воспользоваться законом полного тока для расчета амплитуды тока коллектора (стока) $I_{км} = nI_{\partial m}$ и, соответственно, индуктивности

первичной обмотки $L_1 = \frac{U_n t_{np}}{I_{км}} = \mu \frac{w_1^2 S}{l}$, где μ - магнитная проницаемость материала

сердечника трансформатора, а S и l - соответственно его площадь сечения и длина средней линии. Однако при этом не будут учтены неизбежные потери мощности $\Delta P = P_n - P_n$ (в транзисторе, диоде, трансформаторе и прочие), к калькуляции которых обратимся позже.

Поэтому представляется более правильным прежде определить индуктивность L_1 из выражения для потребляемой мощности

$$P_n = \frac{1}{T} \int_0^T U_n i_{\kappa}(t) dt = \frac{U_n^2 t_{np}}{TL_1} \int_0^{t_{np}} t dt = \frac{U_n^2 t_{np}^2}{2TL_1}, \text{ то есть } L_1 = \frac{U_n^2 t_{np}^2}{2T(P_n + \Delta P)},$$

а затем уже рассчитать амплитуду коллекторного тока $I_{км} = \frac{U_n t_{np}}{L_1}$. Закон полного тока

при этом нарушен не будет, если схему преобразователя представить как состоящую из идеальных элементов, а потери мощности учесть путем введения дополнительной обмотки, нагруженной на некий эквивалентный резистор потерь R_n (рис. 3).

5. Теперь, выбрав сердечник, можем рассчитать количества витков обмоток $w_1 = \sqrt{\frac{L_1 l}{\mu S}}$

и $w_2 = nw_1$, а также амплитуды напряженности поля $H_m = \frac{I_{км} w_1}{l}$ и индукции

$B_m = \frac{U_n t_{np}}{w_1 S} = \frac{U_n + U_{\partial 0}}{nw_1 S} t_{обп}$ в сердечнике трансформатора. При этом необходимо уточнить

значение магнитной проницаемости материала сердечника, поскольку она зависит от напряженности поля (указывается изготовителем). Например, для отечественных пресс-

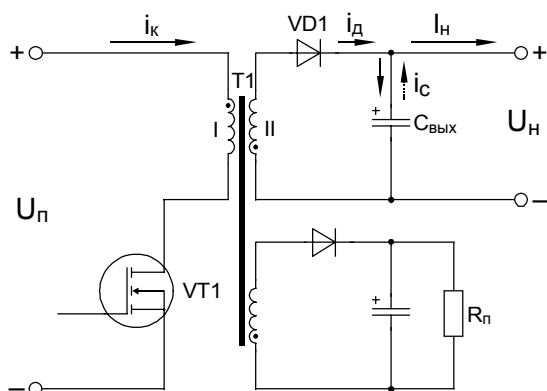


Рис. 3.

пермаллоев [2] зависимость $\mu(H)$ в первом приближении можно считать линейно спадающей, поэтому при уточнении имеет смысл положить $\mu = \mu(0,5H_m)$.

Рассмотрим составляющие потерь мощности ΔP .

1. Потери мощности в датчике тока $R_{\text{ом}}$:

$$\Delta P_{\text{ом}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\kappa}^2(t) R_{\text{ом}} dt = \frac{R_{\text{ом}}}{T} \int_0^{t_{\text{np}}} \left(I_{\text{км}} \frac{t}{t_{\text{np}}} \right)^2 dt = \frac{I_{\text{км}}^2 R_{\text{ом}} t_{\text{np}}}{3T}.$$

Сопротивление датчика тока определяется из условия создания на нем падения напряжения, необходимого для функционирования схемы управления СУ.

2. Потери мощности в транзисторе складываются из потерь статических и динамических (на переключение):

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= \frac{1}{T} \int_0^T i_{\kappa}^2(t) R_m dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_{C_m}^2(t)}{R_m} dt = \frac{R_m}{T} \int_0^{t_{\text{np}}} \left(I_{\text{км}} \frac{t}{t_{\text{np}}} \right)^2 dt + \frac{1}{TR_m} \int_0^{t_{\text{np}}} \left(U_n e^{-\frac{t}{K_m C_m}} \right)^2 dt = \\ &= \frac{I_{\text{км}}^2 R_m t_{\text{np}}}{3T} + \frac{U_n^2 C_m}{2T} \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{np}}}{R_m C_m}} \right), \end{aligned}$$

где C_m - выходная емкость транзистора.

3. Потери мощности в трансформаторе складываются из потерь в активных сопротивлениях обмоток

$$\begin{aligned} \Delta P_{1,2} &= \frac{1}{T} \int_0^T i_{\kappa}^2(t) R_1 dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{д}}^2(t) R_2 dt = \frac{R_1}{T} \int_0^{t_{\text{np}}} \left(I_{\text{км}} \frac{t}{t_{\text{np}}} \right)^2 dt + \frac{R_2}{T} \int_0^{t_{\text{опр}}} \left[I_{\text{ом}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{опр}}} \right) \right]^2 dt = \\ &= \frac{I_{\text{км}}^2 R_1 t_{\text{np}} + I_{\text{ом}}^2 R_2 t_{\text{опр}}}{3T} \end{aligned}$$

и потерь на перемагничивание $\Delta P_{\text{пер}}$.

Первые зависят от длины и диаметра проводов обмоток (см. приложение), а вторые – от материала и объема (массы) сердечника, амплитуды индукции и рабочей частоты

$f = \frac{1}{T}$ (указываются изготовителем).

4. Потери мощности в диоде:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{д}} &= \frac{1}{T} \int_0^T [U_{\text{д0}} i_{\text{д}}(t) + i_{\text{д}}^2(t) R_{\text{д}}] dt = \frac{U_{\text{д0}} I_{\text{ом}}}{T} \int_0^{t_{\text{опр}}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{опр}}} \right) dt + \frac{I_{\text{ом}}^2 R_{\text{д}}}{T} \int_0^{t_{\text{опр}}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{опр}}} \right)^2 dt = \\ &= \frac{I_{\text{ом}} t_{\text{опр}}}{T} \left(\frac{U_{\text{д0}}}{2} + \frac{I_{\text{ом}} R_{\text{д}}}{3} \right). \end{aligned}$$

5. Прочие потери мощности (на управление, в демпфирующих цепях, «подгрузки» и т.д.) ΔP_{np} . В первом приближении их можно считать фиксированными.

Приступая к расчету, в формуле для индуктивности L_1 можно положить $\Delta P = 0$, после чего, рассчитав потери мощности, уточнить полученное значение. Как показывает практика, для получения приемлемых результатов бывает достаточно 3-5 итераций.

Наконец, если заданы пульсации напряжения на нагрузке ΔU_n можно определить емкость идеального выходного конденсатора $C_{вых}$. Для этого достаточно проинтегрировать его зарядный ток:

$$C_{вых} = \frac{1}{\Delta U_n} \int_0^{t_3} [i_o(t) - I_n] dt = \frac{I_{\partial m} t_{обp}}{2 \Delta U_n} \left(1 - \frac{I_n}{I_{\partial m}} \right)^2,$$

где $t_3 = \left(1 - \frac{I_n}{I_{\partial m}} \right) t_{обp}$ - время заряда (см. рис. 2).

Для примера рассчитаем преобразователь со следующими исходными данными:

- вход: $U_n = (170...370)B$;
- выход: $U_n = 5B$ с пульсацией $\Delta U_n = 0,05B$, $I_n = 2A$ ($P_n = 10Bm$);
- частота преобразования – $100кГц$ ($T = 10 \cdot 10^{-6} C$);
- транзистор: IRFRC20 ($U_{\kappa \max} \leq 600B$, $I_{\kappa \max} \leq 1,3A$, $R_m = 4,4Om$, $C_m = 50 * 10^{-12} \Phi$);
- диод: два параллельно включенных MBRS240 ($U_{\partial 0} = 0,333B$, $R_o = 0,013Om$);
- сердечник трансформатора: 77120-A7 Magnetics (материал - KoolMμ, $\mu = (1,5625 - 2,2135 \cdot 10^{-4} H) \cdot 10^{-4} m \cdot M / A$, $S = 19,2 \cdot 10^{-6} m^2$, $l = 42,3015 \cdot 10^{-3} m$, $V_c = 812 \cdot 10^{-9} m^3$, $\Delta P_{nep} = 1,042175 B_m^2 f^{1,46} V_c Bm / m^3$);
- сопротивление датчика тока $R_{\partial m}$ - из условия падения напряжения на нем $1B$ при токе $i_{\kappa} = I_{\kappa m}$.

Положив $U_{\kappa m \max} = 451B$ и $t_{n \min} = 0$, получаем:

$$n = \frac{U_n + U_{\partial 0}}{U_{\kappa m \max} - U_{n \max}} = \frac{5 + 0,333}{451 - 370} = 0,06584,$$

$$U_{\partial m \max} = n U_{n \max} + U_n = 0,06584 \cdot 370 + 5 \approx 29,361[B],$$

$$t_{обp} = \frac{T - t_{n \min}}{1 + \frac{U_n + U_{\partial 0}}{n U_{n \min}}} = \frac{10 - 0}{1 + \frac{5 + 0,333}{0,06584 \cdot 170}} \cdot 10^{-6} \approx 6,77 \cdot 10^{-6} [C],$$

$$t_{np \max} = \frac{U_n + U_{\partial 0}}{n U_{n \min}} t_{обp} = \frac{5 + 0,333}{0,06584 \cdot 170} \cdot 6,77 \cdot 10^{-6} \approx 3,23 \cdot 10^{-6} [C],$$

$$I_{\partial m} = \frac{2TP_n}{U_n t_{обp}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10}{5 \cdot 6,77 \cdot 10^{-6}} \approx 5,906[A],$$

$$\Delta P_{\partial} = \frac{I_{\partial m} t_{обp}}{T} \left(\frac{U_{\partial 0}}{2} + \frac{I_{\partial m} R_{\partial}}{3} \right) = \frac{5,906 \cdot 6,77 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{0,333}{2} + \frac{5,906 \cdot 0,013}{3} \right) \approx 0,768[Bm]$$

Далее – несколько итераций для определения количеств витков обмоток, потерь мощности и КПД. При этом полагалось следующее:

- $U_n = U_{n \min}$ и, соответственно, $t_{np} = t_{np \max}$;
- обмотки трансформатора – однослойные;
- диаметр провода обмоток – не более $0,355mm$;
- толщина изоляции между обмотками I и II, включая обмотку питания СУ – $0,28mm$.
- прочие потери составляют $0,8Bt$.

Таблица

| Шаг | 0 | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| $L_1 \cdot 10^{-6}, \Gamma H$ | 1504,8 | 1208,7 | 1191,9 | 1190,5 |
| $I_{км}, A$ | 0,365 | 0,454 | 0,460 | 0,461 |
| w_1 | 153 | 138 | 137 | 137 |
| w_2 | 10 | 9 | 9 | 9 |
| $H_m, A/м$ | 1318 | 1481 | 1492 | 1493 |
| $\mu \cdot 10^{-4}, m \cdot м/A$ | 1,4166 | 1,3986 | 1,3974 | 1,3973 |
| B_m, m | 0,1868 | 0,2071 | 0,2086 | 0,2086 |
| $R_{ом}, Ом$ | 2,7430 | 2,2032 | 2,1726 | 2,1700 |
| $R_1, Ом$ | 3,917 | 2,715 | 2,695 | 2,695 |
| $R_2, Ом$ | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,007 |
| $\Delta P_{ом}, Вт$ | 0,039 | 0,049 | 0,050 | 0,050 |
| $\Delta P_m, Вт$ | 0,135 | 0,170 | 0,173 | 0,173 |
| $\Delta P_{1,2}, Вт$ | 0,119 | 0,115 | 0,116 | 0,116 |
| $\Delta P_{неп}, Вт$ | 0,589 | 0,724 | 0,734 | 0,734 |
| $\Delta P, Вт$ | 2,450 | 2,625 | 2,641 | 2,641 |
| КПД | 0,803 | 0,792 | 0,791 | 0,791 |

Наконец, емкость идеального выходного конденсатора

$$C_{вых} = \frac{I_{ом} t_{обп}}{2\Delta U_n} \left(1 - \frac{I_n}{I_{ом}}\right)^2 = \frac{5,906 \cdot 6,77 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,05} \left(1 - \frac{2}{5,906}\right)^2 \approx 175 \cdot 10^{-6} [\Phi].$$

Представляет интерес получить зависимости КПД от мощности в нагрузке P_n и питающего напряжения U_n при теперь уже известных количествах витков обмоток и других параметрах схемы. Это можно сделать, например, следующим образом.

Задав значение амплитуды тока коллектора, определяем длительности прямого и обратного ходов:

$$t_{np} = L_1 \frac{I_{км}}{U_n} \text{ и } t_{обп} = \frac{nU_n}{U_n + U_{д0}} t_{np} \text{ (здесь так же, как и ранее, при расчете индуктивности } L_1$$

следует положить $\mu = \mu(0,5H_m)$, где $H_m = \frac{I_{км} w_1}{l}$).

Далее можем рассчитать потребляемую мощность P_n и мощности потерь в датчике тока $\Delta P_{ом}$, транзисторе ΔP_m , в активном сопротивлении первичной обмотки ΔP_1 и на перемагничивание $\Delta P_{неп}$. В результате баланс мощностей $P_n = P_n + \Delta P$ превращается в квадратное уравнение относительно амплитуды тока через диод $I_{ом}$:

$$\frac{t_{обп}}{T} \left(\frac{R_2 + R_d}{3} I_{ом}^2 + \frac{U_n + U_{д0}}{2} I_{ом} \right) + \Delta P_{ом} + \Delta P_m + \Delta P_1 + \Delta P_{неп} + \Delta P_{np} = P_n,$$

решением которого является

$$I_{ом} = \sqrt{\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{U_n + U_{д0}}{R_2 + R_d} \right)^2 + \frac{3T(P_n - \Delta P_{ом} - \Delta P_m - \Delta P_1 - \Delta P_{неп} - \Delta P_{np})}{t_{обп}(R_2 + R_d)} - \frac{3}{4} \cdot \frac{U_n + U_{д0}}{R_2 + R_d}}.$$

Теперь можем рассчитать мощность в нагрузке P_n и КПД.

На рис. 4 показаны расчетные зависимости КПД от мощности в нагрузке и питающего напряжения для рассмотренного выше примера.

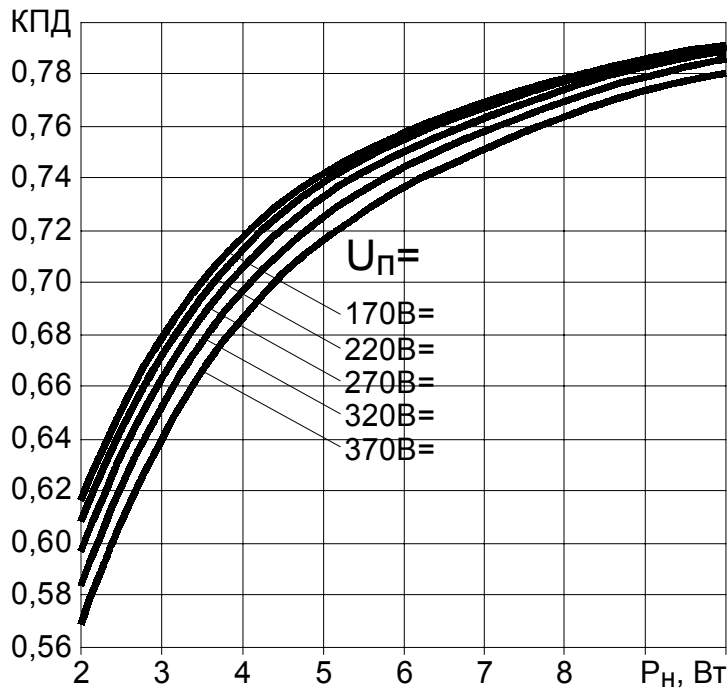


Рис. 4.

Приложение

Активные сопротивления обмоток трансформатора, необходимые для расчета потерь мощности, зависят от длины провода, его диаметра и марки (удельного сопротивления). Например, активное сопротивление 1мм провода марки ПЭВ-2 [3] составляет

$$R_{1\text{мм}} \approx \frac{22}{D_{np}^2} \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где D_{np} - диаметр провода «по меди» (здесь и далее все размеры – в мм).

Длина провода и его диаметр зависят от конструкции трансформатора – типа сердечника, наличия и размеров каркаса, допустимого количества слоев провода в обмотках, количества проводов в них и т. д.

Продemonстрируем подход к определению активных сопротивлений обмоток на примере трансформатора на кольцевом сердечнике (торе).

Если кольцевой сердечник имеет внутренний диаметр $D_{внутр}$, то, как следует из рис. 5 (вид сверху), на него можно намотать в один слой w витков провода с диаметром «по изоляции» $D_{np.из}$:

$$w = \frac{2\pi}{2 \arcsin \frac{0,5D_{np.из}}{0,5(D_{внутр} - D_{np.из})}}.$$

Отсюда

$$D_{np.из} = \frac{D_{внутр}}{1 + \frac{1}{\sin \frac{\pi}{w}}}.$$

Диаметр провода «по меди» для марок ПЭВ-2 и ПЭВТЛ-2 [3] составит

$$D_{пр} \approx \frac{D_{пр.из} - 0,025}{1,079}.$$

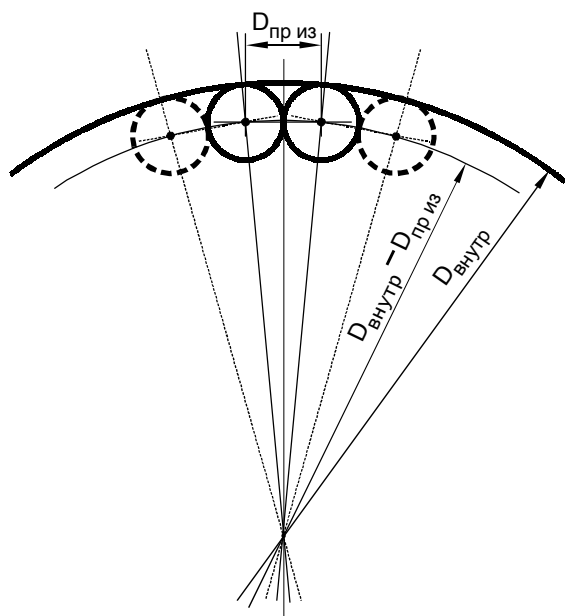


Рис. 5.

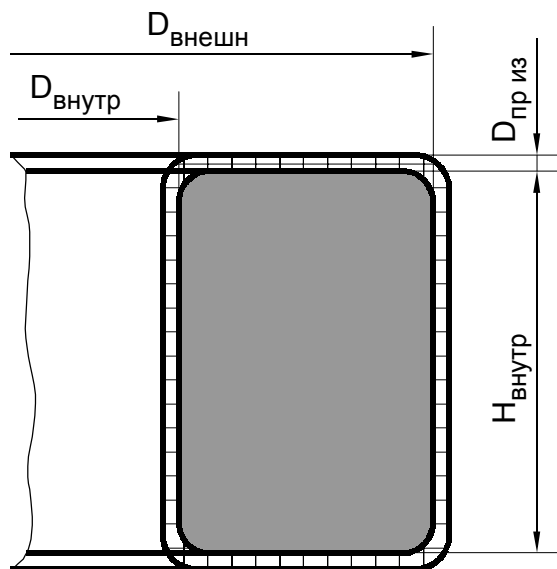


Рис. 6.

Следовательно, если необходимо намотать w витков в один слой на сердечник, имеющий внутренний диаметр $D_{внутр}$, и учитывая с помощью коэффициента укладки $k_{укл} \leq 1$ то обстоятельство, что реально укладываемое количество витков всегда меньше расчетного, диаметр провода «по меди» должен быть не более

$$D_{пр} \approx 0,9268 \left(\frac{D_{внутр}}{1 + \frac{k_{укл} \pi}{w}} - 0,025 \right).$$

Длина провода обмотки в w витков в первом приближении (по средней линии), как следует из рис. 6 (вид спереди – в разрезе), составит

$$L_w \approx w [2(H_{внутр} + 2D_{пр.из}) + D_{внешн} - D_{внутр}].$$

Следовательно, активное сопротивление обмотки

$$R_w = 22 \cdot 10^{-6} \frac{L_w}{D_{пр}^2}.$$

Вторая обмотка, наматываемая поверх первой через слой изоляции толщиной $S_{из}$, рассчитывается таким же образом с учетом того, что внешний диаметр $D_{внешн}$ и высота $H_{внутр}$ сердечника увеличились, а его внутренний диаметр $D_{внутр}$ уменьшился - на величину $2(D_{пр.из} + S_{из})$.

Таким образом, рассмотрена работа и предложена методика расчета обратноходового преобразователя напряжения (ОПН) при номинальной мощности в нагрузке. Для полноты картины следует рассмотреть работу ОПН при превышении мощностью в нагрузке номинального значения, то есть формирование выходной характеристики ОПН в режиме перегрузки.

Очевидно, что с уменьшением сопротивления нагрузки R_n неизбежно наступит момент, когда тока коллектора достигнет уровня ограничения (допустим, $I_{км}$). Следовательно, выходное напряжение (на нагрузке) U_n , стабилизируемое до того при помощи цепи обратной связи на номинальном уровне $U_{н.ном}$, начнет уменьшаться. Это, в свою очередь, приведет к увеличению длительности обратного хода $t_{обр}$. С момента,

когда $T - t_{обр} = \frac{L_1 I_{км}}{U_n}$, ОПН, рассчитанный на работу в прерывном режиме [при

номинальной мощности в нагрузке], перейдет в непрерывный режим (T - период переключений транзистора, L_1 - индуктивность первичной обмотки трансформатора, а U_n - входное напряжение).

Рассмотрим эти два этапа подробно.

На первом из них (рис. 7), когда еще сохраняется прерывный режим, длительность прямого хода постоянна:

$$t_{пр} = \frac{L_1 I_{км}}{U_n}.$$

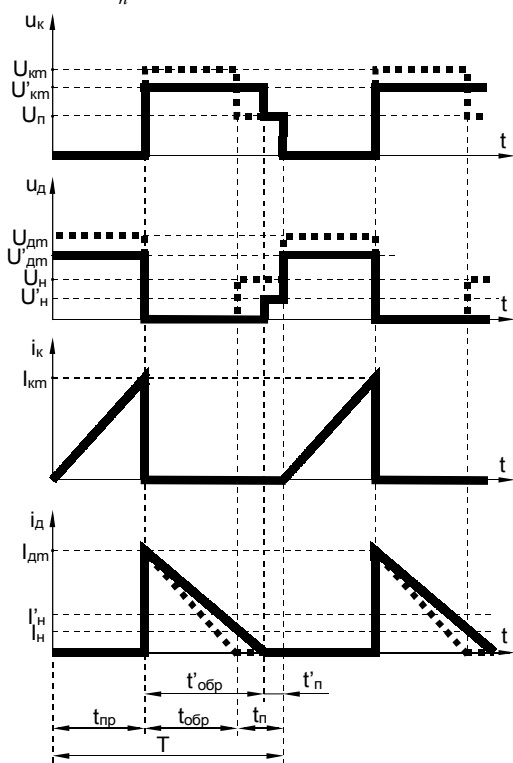


Рис. 7.

Длительность же обратного хода зависит от выходного напряжения:

$$t_{обр} = \frac{nU_n t_{пр}}{U_n + U_{\partial 0}},$$

где $n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$ - коэффициент трансформации, а $U_{\partial 0}$ - падение напряжения на выпрямительном диоде.

Отсюда – выходное напряжение U_n^* , соответствующее граничному режиму:

$$U_n^* = \frac{nU_n t_{np}}{T - t_{np}} - U_{\delta 0}.$$

Определение зависимости $I_n(U_n)$ на этом этапе, то есть при выходных напряжениях $U_n \in [U_{н.ном}; U_n^*]$, сводится к определению мощности в нагрузке $P_n = U_n I_n$, которая, с другой стороны, есть постоянная (заданная) потребляемая мощность

$$P_n = \frac{U_n I_{км} t_{np}}{2T} = \frac{L_1 I_{км}^2}{2T} \text{ за вычетом мощности потерь } \Delta P.$$

Составляющие мощности потерь были подробно рассмотрены ранее. Подставив их выражения в уравнение баланса мощностей $P_n = P_n + \Delta P$, получим квадратное уравнение относительно амплитуды тока через диод $I_{дм}$, решив которое и найдем

$$\text{искомую зависимость } I_n(U_n) = \frac{t_{обр}}{2AT} \left(\sqrt{0,25B^2 + AC} - 0,5B \right),$$

$$\text{где } A = \frac{R_2 + R_\delta}{3}, \quad B = \frac{U_n + U_{\delta 0}}{2}, \quad C = \frac{P_n - \Delta P_{ном} T}{t_{обр}},$$

$\Delta P_{ном} = \Delta P_m + \Delta P_{дм} + \Delta P_1 + \Delta P_{пер} + \Delta P_{np}$ – мощность потерь, не зависящих от входного напряжения.

Далее следует второй этап - непрерывный режим (рис. 8).

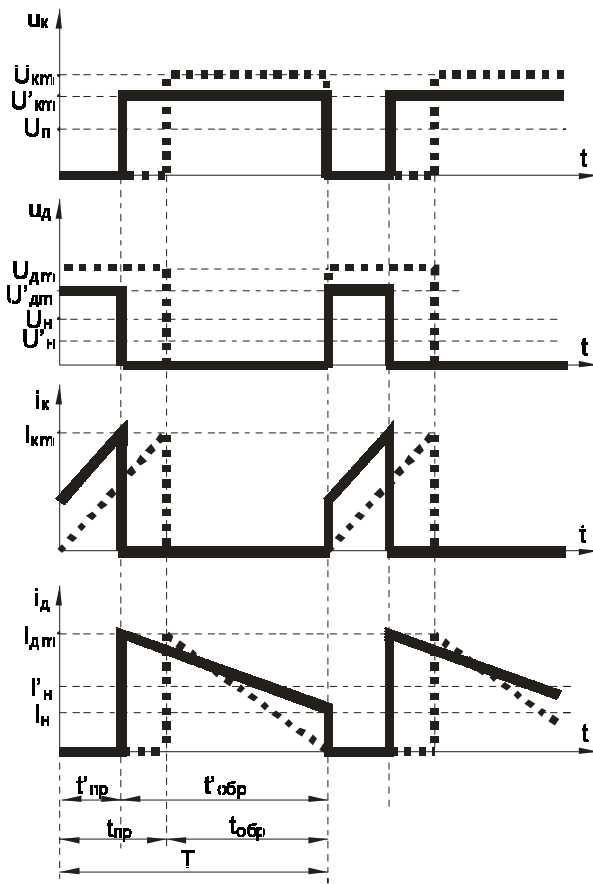


Рис. 8.

Установившийся режим работы ОПН на этом этапе описывается следующей системой уравнений:

$$T = t_{np} + t_{обр};$$

$$t_{np} = \frac{L_1 \Delta I_{\kappa}}{U_n};$$

$$t_{обп} = \frac{n U_n t_{np}}{U_n + U_{\partial 0}};$$

$$P_n = P_n + \Delta P;$$

$$P_n = \frac{U_n}{T} \int_0^{t_{np}} \left(I_{\kappa m} - \Delta I_{\kappa} + \Delta I_{\kappa} \frac{t}{t_{np}} \right) dt = \frac{U_n t_{np}}{T} \left(I_{\kappa m} - \frac{\Delta I_{\kappa}}{2} \right);$$

$$P_n = U_n I_n;$$

$$I_n = \frac{1}{T} \int_0^{t_{обп}} \left(I_{\partial m} - \Delta I_{\partial} \frac{t}{t_{обп}} \right) dt = \frac{t_{обп}}{T} \left(I_{\partial m} - \frac{\Delta I_{\partial}}{2} \right);$$

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{\partial m} + \Delta P_1 + \Delta P_{nep} + \Delta P_2 + \Delta P_{\partial} + \Delta P_{np};$$

После преобразований получим баланс мощностей в виде:

$$P_n = \bar{t}_{обп} (R_2 + R_{\partial}) I_{\partial, cp}^2 + \bar{t}_{обп} (U_n + U_{\partial 0}) I_{\partial, cp} + \bar{t}_{обп} \frac{R_2 + R_{\partial}}{3} \Delta I_{\partial, cp}^2 + \Delta P_{nocm},$$

$$\text{где } \bar{t}_{обп} = \frac{t_{обп}}{T}, I_{\partial, cp} = I_{\partial m} - \Delta I_{\partial, cp}, \Delta I_{\partial, cp} = \frac{\Delta I_{\partial}}{2}.$$

Таким образом, имеем квадратное уравнение

$$A I_{\partial, cp}^2 + B I_{\partial, cp} - C = 0,$$

$$\text{где } A = R_2 + R_{\partial}, B = U_n + U_{\partial 0} \text{ и } C \approx \frac{P_n - \Delta P_{nocm}}{\bar{t}_{обп}}.$$

$$\text{Его решение дает амплитуду тока через диод } I_{\partial, cp} = -\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{C}{A}} \text{ и,}$$

соответственно, ток нагрузки I_n в зависимости от выходного напряжения U_n .

Для рассмотренного выше примера ($U_{н.ном} = 5B$; $T = 10 \text{ мкс}$; $I_{\kappa m} = 0,461A$; сердечник трансформатора - 77120-A7 Magnetics с объемом $V_c = 812 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$; $L_1 = 1190,5 \text{ мкГн}$; активные сопротивления обмоток - $R_1 = 2,695 \text{ Ом}$ и $R_2 = 0,007 \text{ Ом}$; $n = 0,06584$; амплитудное значение индукции $B_m = 0,2086 \text{ м}$; транзистор - IRFRC20 с сопротивлением в открытом состоянии $R_m = 4,4 \text{ Ом}$ и выходной емкостью $C_m = 50 \text{ нФ}$; диод - 2xMBRS240 с падением напряжения $U_{\partial 0} = 0,333 \text{ В}$ и сопротивлением $R_{\partial} = 0,013 \text{ Ом}$, сопротивление датчика коллекторного тока - $R_{\partial m} = 2,17 \text{ Ом}$) на рис. 9 представлены зависимости $I_n(U_n)$ для разных значений входного напряжения $U_n = (170 \dots 370) \text{ В}$. Как видим, они практически совпадают друг с другом и довольно линейны на начальных участках, поэтому с достаточной для инженерной практики точностью могут быть аппроксимированы прямой линией, проходящей через точки, соответствующие, например, $I_n(U_{н.ном})$ и $I_n(U_n^*)$ для $U_n = U_{н.макс}$. Уравнение этой прямой и может быть использовано для формирования выходной характеристики ОПН в режиме перегрузки.

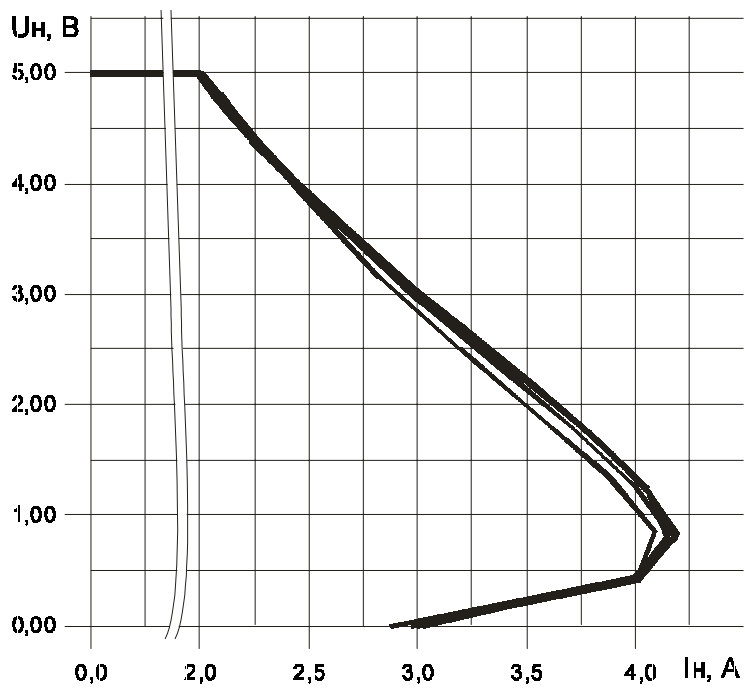


Рис. 9.

Литература

1. Ненахов С.М. Анализ процесса запуска обратноходового преобразователя напряжения. – «Электрическое питание», 2005 г., №1, с. 16-17 и №2, с. 15-17.
2. ПЯ0.707.180ТУ.
3. Белоруссов Н.И. и др. Электрические кабели, провода и шнуры / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988 г.

Опубликовано в журнале «Электрическое питание», 2005 г., №3, с. 10-13 и 2006 г., №2, с. ...-....