



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ известных методов улучшения эксплуатационных характеристик выпрямителей

Кириллов Н. П., доктор техн. наук,
Буренин В. В., Рудницкая Т. А., кандидаты техн. наук,
Катаржин А. В., Полянский В. И., доктора техн. наук

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Определены параметры одно- и трехфазных выпрямителей. Выявлены структуры типовых выпрямителей. Оценено влияние качества выпрямленного напряжения на работу потребителей и операторов связи и управления. Рассмотрены схемы многофазных выпрямителей и дана их сравнительная оценка. Построены графики, отражающие связь между коэффициентом пульсации и параметрами выпрямителей.

Ключевые слова: выпрямитель, коэффициент пульсаций, схема выпрямления, ячейка, преобразовательный трансформатор.

В последние годы в системах электроснабжения ответственных объектов все большее применение находят многофазные (особенно двенадцати-, восемнадцати- и двадцатичетырехфазные) выпрямители [1–5]. Они характеризуются следующей совокупностью параметров: энергетических (КПД η , удельная мощность γ_P), массогабаритных (масса G , объем V , удельная масса γ_G и удельный объем γ_V), эксплуатационных (коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $K_{п1}$, стабильность выходного напряжения ΔU), электрических (фазное напряжение сети U_2 , число фаз сети m , частота сети f , частота пульсаций выпрямленного напряжения ω_1 и его среднее значение $U_{ср}$).

При исследовании выпрямителей за исходную схему примем преобразовательную ячейку (ПЯ) — см. рис. 1, содержащую трехфазный преобразовательный трансформатор ПТ с первичной и вторичной обмотками, а также блок кремниевых вентилях БВК, включающий в себя шесть диодов, соединенных по схеме А. Н. Ларионова.

Параметры ПЯ можно получить на основе гармонического анализа выходного напряжения, используя изложенные в [1] рекомендации. При этом будем рассматривать только те параметры, которые входят в указанную выше совокупность. К ним относятся:

частота пульсаций или частота основной (первой) гармоники переменной составляю-

щей выпрямленного напряжения (здесь и далее приведены параметры соответственно для одно- и двухтактных схем):

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= m\omega; \\ \omega_1 &= 2m\omega, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота переменного напряжения;

среднее значение выпрямленного напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_{ср} &= f(m, U_{2m}, \sin \pi/m); \\ U_{ср} &= f(m, U_{2лm}, \sin \pi/2m), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где U_{2m} , $U_{2лm}$ — амплитуды фазного и линейного напряжений;

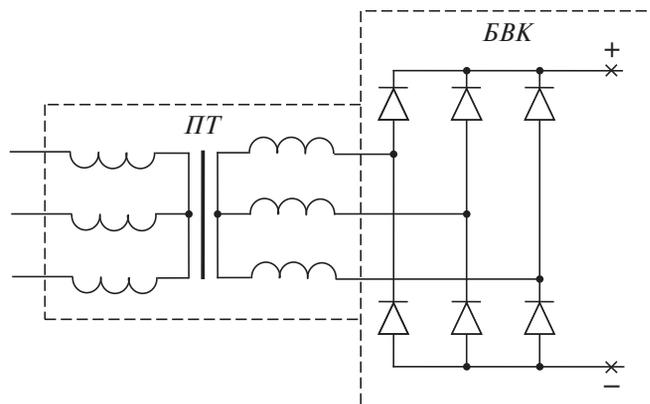


Рис. 1

максимальное значение обратного напряжения, прикладываемого к вентилю:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{обр}m} &= (2\pi/m)U_{\text{ср}}; \\ U_{\text{обр}m} &= U_{2lm}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (по первой гармонике):

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{пл}} &= 2/(m^2-1); \\ K_{\text{пл}} &= 2/[(2m)^2-1]; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

средняя мощность постоянной составляющей выпрямленного напряжения:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{ср}} &= f\{U_{2m}, I_{2m}, [(m/\pi)\sin(\pi/m)^2]\}; \\ P_{\text{ср}} &= U_{\text{ср}} I_{\text{ср}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где I_{2m} — амплитуда фазного тока; $I_{\text{ср}}$ — среднее значение выпрямленного тока;

среднее значение мощности нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{н.ср}} &= f\{m/4\pi, U_{2m}, I_{2m}, [(2\pi/m)+\sin 2\pi/m]\}; \\ P_{\text{н.ср}} &= fm/2\pi, U_{2lm}, I_{2lm}, [(\pi/m)+\sin \pi/m], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где I_{2lm} — амплитуда линейного тока;

коэффициент преобразования мощности (для одно- и двухтактных схем)

$$K_{\text{пр.м}} = P_{\text{ср}}/P_{\text{н.ср}}; \quad (7)$$

коэффициент использования трансформатора по мощности (для одно- и двухтактных схем)

$$K_{\text{и.м}} = P_{\text{ср}}/P_{\text{т}}, \quad (8)$$

где

$$P_{\text{т}} = (m/2)(U_1 I_1 + U_2 I_2) \quad (9)$$

— габаритная (расчетная) мощность трансформатора для однотактных схем при $m_1 = m_2 = m$; U_1, I_1, U_2, I_2 — действующие значения фазных напряжений и токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

В общем случае габаритную мощность силового трансформатора рассчитывают по формуле [6]

$$P = mUI, \quad (10)$$

где U, I — фазные напряжение и ток сети.

Полагаем, что указанные электрические и конструктивные параметры ПЯ являются определяющими при анализе известных способов совершенствования характеристик выпрямителей и средств их технической реализации

с учетом требований, предъявляемых рядом потребителей к качеству выпрямленного напряжения. Одно из этих требований относится к значению коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения, которое должно быть минимальным для всего диапазона изменения тока нагрузки, при этом считается, что допустимые значения этого параметра для аппаратуры систем связи находятся в интервале

$$0,01 \% \leq K_{\text{пл}} \leq 0,05 \% \quad (11)$$

номинального значения напряжения питания.

Другое важное требование относится к значению напряжения пульсаций, создающему помехи в подключенной к выпрямителю аппаратуре. Его можно оценить по методике В. П. Багуца [7].

Третье требование к качеству выпрямленного напряжения состоит в нейтрализации отрицательного воздействия пульсаций напряжения — их амплитуд и частот.

Если в выпрямленном напряжении имеются гармоники с частотами f_1, f_2, \dots, f_n , амплитудные напряжения которых — соответственно U_1, U_2, \dots, U_n , то полное эффективное напряжение помех определяется как среднеквадратичное из выражения

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{\left(\frac{U_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_n}{\sqrt{2}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{0,5(U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Напряжение помех с учетом чувствительности органов слуха человека к колебаниям различных частот (его называют псофометрическим) вычисляют по формуле

$$U_{\text{псоф}} = \sqrt{0,5[(U_1\alpha_1)^2 + (U_2\alpha_2)^2 + \dots + (U_n\alpha_n)^2]}, \quad (13)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ — псофометрические коэффициенты соответствующих гармоник (используются в акустике).

Значения псофометрических коэффициентов (полученных экспериментально) и соответствующих им частот приведены в табл. 1. За базовую принята частота $f = 800$ Гц. Превышающие ее частоты воспринимаются громче, а более низкие — менее громко.

В таблице заштрихованы частоты гармоник переменной составляющей выпрямленного напряжения, отрицательное воздействие которых на человека наибольшее. Особенно это касается двух частотных диапазонов 500 — 1300 Гц и 1400 — 3000 Гц.

Таблица 1

f , Гц	50	100	150	200	250	300	400	500
α_n	0,007	0,008	0,035	0,008	0,295	0,297	0,484	0,505
f , Гц	600	700	750	800	900	1000	1100	1200
α_n	0,861	0,902	0,955	1,0	1,072	1,122	1,072	1,0
f , Гц	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2500	3000
α_n	0,555	0,505	0,861	0,824	0,760	0,708	0,617	0,525
f , Гц	3500	4000	5000	–	–	–	–	–
α_n	0,375	0,177	0,016	–	–	–	–	–

Таблица 2

Выпрямитель	Число первичных обмоток	Число вторичных обмоток	Число трехфазных сердечников	Число диодов	Коэффициент пульсаций	Общее число обмоток
Рис. 3.2 [4] (см. рис. 1)	1	1	1	6	0,0570	2
Рис. 3.3, а [4]	1	2	1	12	0,0140	3
Рис. 3.3, б [4]	1	2	1	12	0,0140	3
Рис. 3.4 [3]	2	4	2	12	0,0140	6
Рис. 3.5 [3]	3	6	3	18	0,0062	9
Рис. 3.6 [4]	1	4	1	24	0,0035	5

Указанные требования можно реализовать путем увеличения числа выпрямлений, однако для этого потребуются большой расход электротехнических материалов и сложная технология изготовления преобразовательного трансформатора [6].

Примером многофазного выпрямителя является 12-фазный, последовательная и параллельная схемы которого приведены в [4]. Следует отметить, что в этих схемах при одной первичной трехфазной обмотке используются по две вторичные обмотки, двенадцать диодов и один реактор, а сам выпрямитель — двухтактный. Если его выполнить однотактным, то общая схема 12-фазного выпрямителя преобразуется к виду, показанному в [3], при этом число реакторов возрастает до четырех (в некоторых случаях реакторы выполняют роль дросселя фильтра).

На некоторых объектах применяются собранные по однотактной схеме 18-фазные выпрямители с шестью дросселями фильтра, причем параллельно выходным клеммам включается конденсатор фильтра. В таких

выпрямителях число первичных трехфазных обмоток равно трем и преобразовательный трансформатор содержит три силовых трансформатора [3].

Дальнейшее увеличение числа фаз выпрямления возможно при условии изменения схем включения обмоток ПТ, напряжения которых подаются на мостовые схемы выпрямления. Так, для 24-фазного выпрямителя ($m = 24$), кроме обмоток, соединенных в звезду и треугольник, потребуется пара обмоток, соединенных в зигзаг, а при большем m — большее число обмоток [4, 6].

Создание выпрямителей с большим числом фаз выпрямления приводит к значительному изменению электрических, функциональных, структурных, динамических и конструктивных связей между его элементами. В табл. 2 для сравнения приведены данные (в основном конструктивные) 6-фазного, трех 12-фазных, а также 18- и 24-фазных выпрямителей при заданном коэффициенте пульсаций. По этим данным на рис. 2 построены зависимости $\eta = f[m(N_B)]$ и $K_{\Pi} = f[m(N_B)]$, (где N_B — чис-

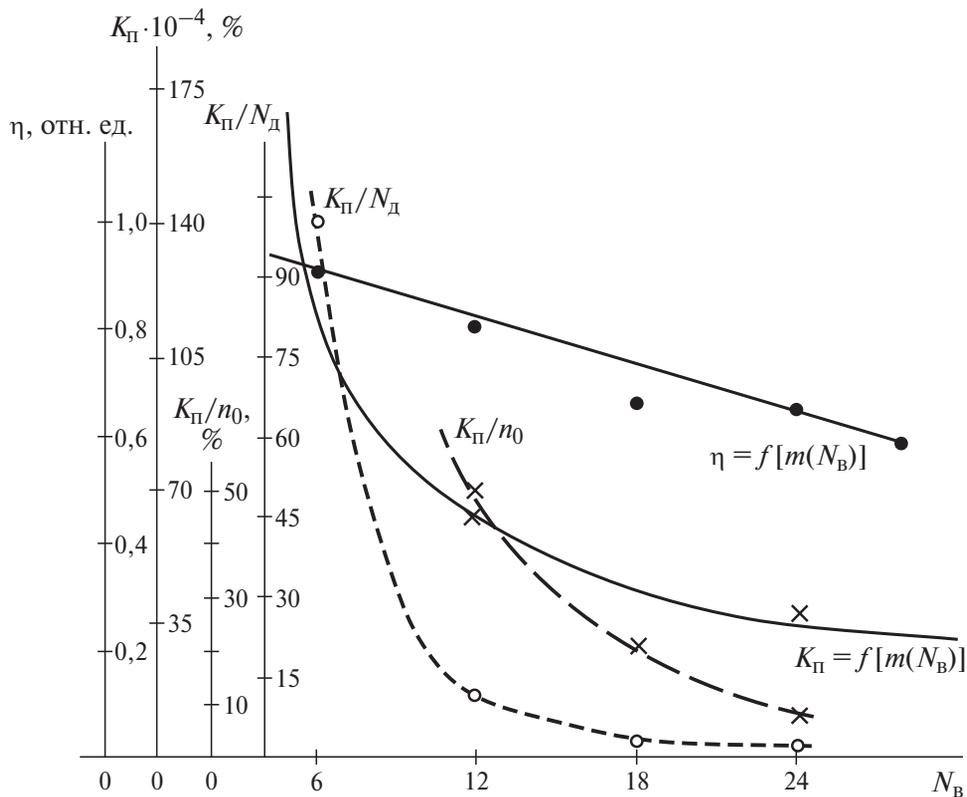


Рис. 2

ло вентилях схем). Помимо них можно рассчитывать и непосредственные значения параметров выпрямителей и их отдельных элементов.

Ввиду того, что элементная база полупроводниковой техники постоянно совершенствуется, рассмотрим влияние числа диодов и обмоток на коэффициент пульсаций. Если считать, что число диодов равно N_d (у рассматриваемых выпрямителей $N_d = 6; 12; 18; 24$), то влияние каждого из них на коэффициент пульсаций в каждой схеме можно определить по соотношению $K_{\pi i}/N_{d i}$ (где i — номер схемы выпрямителя):

$$\frac{K_{\pi 1}}{N_{d 1}} / \frac{K_{\pi 2}}{N_{d 2}} = 8; \quad \frac{K_{\pi 1}}{N_{d 1}} / \frac{K_{\pi 3}}{N_{d 3}} = 29; \quad \frac{K_{\pi 1}}{N_{d 1}} / \frac{K_{\pi 4}}{N_{d 4}} = 63.$$

Если общее число обмоток трансформатора равно n_0 (у данных выпрямителей $n_{01} = 2; n_{02} = 3; n_{03} = 6; n_{04} = 9; n_{05} = 5$), то влияние каждой из обмоток может быть оценено с помощью отношения $K_{\pi i}/n_{0 i}$. Так, если для схемы выпрямления А. Н. Ларионова $K_{\pi 1}/n_{01} = 285 \cdot 10^{-4} \%$, то для 24-фазного выпрямителя $K_{\pi 5}/n_{05} = 7 \cdot 10^{-4} \%$, т. е. при увеличении числа вторичных обмоток ПТ в 4 раза коэффициент пульсаций снизится в 16 раз. Кривые K_{π}/n_0 и K_{π}/N_d для рассматриваемых

схем в зависимости от числа фаз выпрямления показаны на рис. 2.

Таким образом, в известных выпрямителях нейтрализовать высшие гармоники в кривой выпрямленного напряжения можно путем увеличения числа фаз выпрямления у ПТ, при этом число первичных обмоток последних должно быть, как правило, вдвое меньше числа вторичных обмоток в однотактных выпрямителях и существенно меньше их числа в двухтактных выпрямителях.

Диапазон мощностей применяемых в ряде отраслей выпрямителей составляет от 10 до 30 кВт. Из известных способов уменьшения амплитуды переменной составляющей — увеличение числа фаз перед выпрямителем и использование многокаскадных фильтров — применяется только первый, поскольку нагрузка штатных выпрямителей импульсная.

Эффективность указанного метода может быть оценена на основе первой теоремы подобия [4], в соответствии с которой

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = 4 \sqrt[4]{\left(\frac{S_{\text{НОМ}2}}{S_{\text{НОМ}1}}\right)^3}, \quad (14)$$

где $G_2, V_2, C_2, \Delta P_2, S_{\text{НОМ}2}$ — масса, объем, стоимость, потери мощности и полная мощность преобразовательного трансформатора

ПЯ суммарной мощности; G_1 , V_1 , C_1 , ΔP_1 , $S_{\text{ном1}}$ — масса, объем, стоимость, потери мощности и полная мощность преобразовательного единого трансформатора.

Задаваясь числом составных трансформаторов, их мощностями и мощностью единого трансформатора, можно прийти к выводу, что применение одного преобразовательного трансформатора в схеме выпрямителя [3] вместо двух суммарной мощности, равной мощности единого, позволяет получить выигрыш в массе, объеме, стоимости и КПД, равный приблизительно 16 %, а использование одного *ПТ* заданной мощности вместо трех в схеме выпрямителя, приведенной в [3], — выигрыш в массе, объеме, стоимости и КПД, равный 26 %, при условии, что суммарная мощность составных трансформаторов равна мощности единого.

Схемы выпрямителей [4] по указанной методике не оценивались ввиду того, что стоимость трансформаторов с обмотками, соединенными в зигзаг, значительно превышает стоимость составных трансформаторов.

Выводы

1. Наиболее рациональным способом улучшения эксплуатационных характеристик выпрямителей, применяемых в разных отраслях, является увеличение числа фаз перед схемой выпрямления.

2. Из-за сложностей технической реализации этого способа наибольшим числом выпрямления должно быть $m_b = 24$. Тогда наименьший

коэффициент пульсаций $K_{\text{п}} = 0,0035$, а частота пульсаций $\omega_1 = 1200$ Гц.

3. Вследствие ограниченных технических возможностей известных выпрямителей затруднительно с их помощью обеспечить электроэнергией заданного качества микрофонные цепи, входные усилители низкой частоты и задающие генераторы, используемые в устройствах систем связи и управления, без введения дополнительных устройств сглаживания пульсаций.

4. При любом числе фаз известный рациональный метод не позволяет исключить вредные диапазоны частот пульсаций, нарушающие нормальные условия функционирования обслуживающего персонала.

Список литературы

1. **Электропитание** устройств связи / Под ред. О. А. Доморацкого. — М.: Радио и связь, 1981.
2. **Ромаш Э. М.** Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1981.
3. **Источники** электропитания РЭА: Справочник / Под ред. Г. С. Найвельта. — М.: Радио и связь, 1986.
4. **Двенадцатипульсовые** полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Под ред. М. Г. Шалимова. — М.: Транспорт, 1990.
5. **Бурков А. Т.** Электронная техника и преобразователи. — М.: Транспорт, 2001.
6. **Петров Г. Н.** Электрические машины. Ч. 1. — М.: Энергия, 1974.
7. **Багуц В. П., Ковалев Н. П., Костроминов А. М.** Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. — М.: Транспорт, 1991.

madi.1965@mail.ru