

# Автотрансформаторно-выпрямительное устройство с 18-пульсным выпрямлением напряжения

КОНЯХИН С.Ф., МИХЕЕВ В.В., МЫЦЫК Г.С.

*Показано, что трехфазное автотрансформаторно-выпрямительное устройство с пульсностью выпрямленного напряжения  $m_{1\varnothing} = 18$  (АТВУ-18) относится к классу топологически сложных систем, трудно поддающихся модельному временному описанию токов в секциях обмоток, что делает невозможным его оперативное проектирование. Наиболее рациональным путем решения этой задачи является имитационное компьютерное моделирование, на основе которого (в среде PSpice Schematics) получена вся необходимая для проектирования АТВУ-18 информация. Коэффициенты трансформации секций обмоток относительно базовой обмотки с топологией «треугольник» определены аналитическим путем. Возможная топологическая вариантность АТВУ при одной и той же пульсности  $m_{1\varnothing}$  приводит к необходимости сопоставительной оценки альтернативных решений. В качестве оценочного критериального показателя целесообразно использовать габаритную мощность автотрансформатора. Получен этот показатель для рассмотренного варианта АТВУ-18.*

**Ключевые слова:** *трехфазный автотрансформатор, трехканальное выпрямление, 18-пульсное выпрямление, проектирование, параметрические соотношения, моделирование*

Одним из определяющих критериев проектирования электротехнических устройств (ЭТУ) для подвижных объектов, в частности для летательных аппаратов (ЛА), является минимум их массы при ограничениях на КПД и заданных условиях (интенсивного) охлаждения. Для систем электроснабжения (СЭС) ЛА определенного типа возникает задача преобразования переменного трехфазного напряжения  $U_{1\Phi} / U_{1\Delta} = 115/200$ . В стабильной (или изменяющейся в определенных пределах) частоты 400 Гц в постоянное напряжение  $U_{d0} = 270$  В. Преобразователи с такой функциональной характеристикой относятся к классу АС/DC. Решение этой задачи традиционным путем основано на использовании известных способов синтеза трансформаторно-выпрямительных устройств с требуемой пульсностью  $m_{1\varnothing}$  (ТВУ- $m_{1\varnothing}$ ) выпрямленного напряжения. При этом целесообразное значение параметра  $m_{1\varnothing}$  определяется требованиями к допустимому уровню пульсаций выпрямленного напряжения  $u_d(t)$ . Для СЭС ЛА он обычно принимает значения 12; 18; 24.

*It is shown that a three-phase autotransformer-and rectifying device with the output voltage rectified in accordance with a 18-pulse arrangement (ATRD-18) relates to the class of topologically complex systems not readily amenable to modeling the waveforms of currents in winding sections, due to which such a system cannot be designed in a prompt manner. The most rational method of solving this problem is to use simulation on a computer (in the PSpice Schematics environment), based on which all information required for designing the ATRD-18 is obtained. The transformation ratios of winding sections with respect to the delta-connected basic winding are determined analytically. The fact that possible topological versions of an ATRD with the same number of pulses may exist generates the need to carry out a comparative assessment of alternative solutions. It is advisable to use the autotransformer dimension power capacity as an assessment criterion. The value of this criterion is obtained for the considered version of ATRD-18.*

**Key words:** *three-phase autotransformer, three-channel rectification, 18-pulse rectification, designing, parametric correlations*

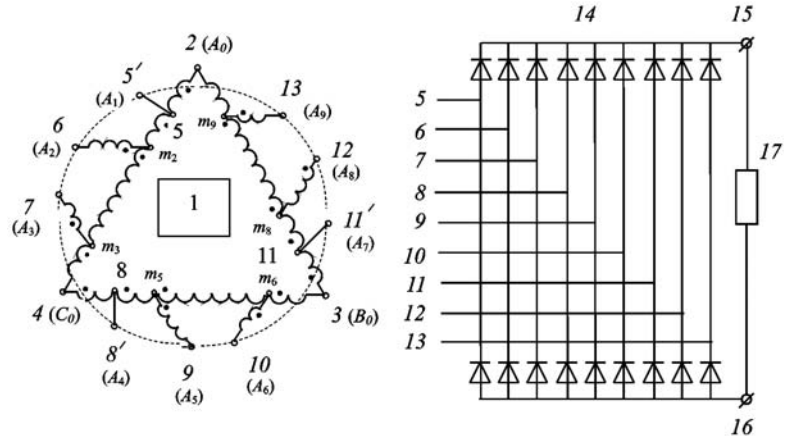
В тех случаях, когда не требуется гальванической развязки входной и выходной цепи, вместо трансформаторного узла может быть применен автотрансформаторный узел (АТВ). В этом случае ТВУ- $m_{1\varnothing}$  превращается в АТВУ- $m_{1\varnothing}$ . Переход от ТВУ к АТВУ обеспечивает значительное улучшение массогабаритных показателей за счет снижения габаритной мощности трансформаторного узла. Проблема структурного синтеза АТВУ- $m_{1\varnothing}$  сводится к отысканию наиболее рациональной топологии трансформаторного узла, обеспечивающей преобразование трехфазной ( $m_1 = 3$ ) системы напряжений в ( $m_{1\varnothing} / 2$ )-фазную систему, из которой затем путем двухполупериодного выпрямления и получают выпрямленное напряжение с пульсностью  $m_{1\varnothing}$ .

Согласно располагаемой нами информации основные способы умножения фазности исходной трехфазной сети изложены у нас в стране еще, например, в [1]. Затем, спустя примерно четверть века после публикации [1] стали появляться зарубежные патенты [2, 3], фактически повторяющие эти способы применительно к АТВУ. Кстати, это

типичный, часто встречающийся факт, располагающий к определенным размышлениям. Заметим, что многообразие вариантов решений этой задачи, как показал проведенный анализ, достаточно велико. Оно определяется следующими факторами: 1) базовой схемой соединения обмоток – «звезда» или «треугольник»; 2) симметричным или несимметричным способом формирования  $(m_{1\varnothing}/2)$ -фазной системы напряжений; 3) числом используемых трехфазных магнитопроводов; 4) некоторыми факторами конструктивно-технологического свойства. Анализ проблемы синтеза АТВУ показывает, что наиболее рациональное его решение из числа альтернативных вариантов может быть определено лишь по критерию его минимальной габаритной мощности АТ (т.е. на основе расчета его габаритной мощности), что требует знания действующих значений напряжений на всех обмотках и протекающих в них токов [4]. Последняя задача не является простой и особенно в варианте, когда используется общий для всех каналов магнитопровод. Под канальностью преобразования  $L$  будем понимать число используемых в АТВУ трехфазных мостовых выпрямителей [5]: при  $m_{1\varnothing} = 12$  значение  $L = 2$ , при  $m_{1\varnothing} = 18$   $L = 3$ , при  $m_{1\varnothing} = 24$   $L = 4$ . Таким образом, параметры  $L$  и  $m_{1\varnothing}$  связаны следующим соотношением:  $L = m_{1\varnothing} / 6$ .

**О схеме АТВУ-18.** Так сложилось, что описанная в [2, 3] и рассматриваемая здесь схема АТВУ-18 привлекла внимание отечественных разработчиков лишь сегодня. Кажущаяся, на первый взгляд, относительная простота технической ее реализации и потенциальная возможность достижения приемлемых массогабаритных показателей в авиационной электротехнике являются важными достоинствами. Последующее более пристальное внимание к ней выразилось в нашем намерении проверить реальную эффективность этого решения на опытном образце. Для этого, в свою очередь, потребовалось проведение исследований по разработке методики проектирования АТВУ-18, что привело к необходимости детального исследования процессов в этой схеме, поскольку только полная ясность о происходящих в ней физических процессах создает необходимые предпосылки для определения необходимых расчетных соотношений и создания на этой основе методики проектирования.

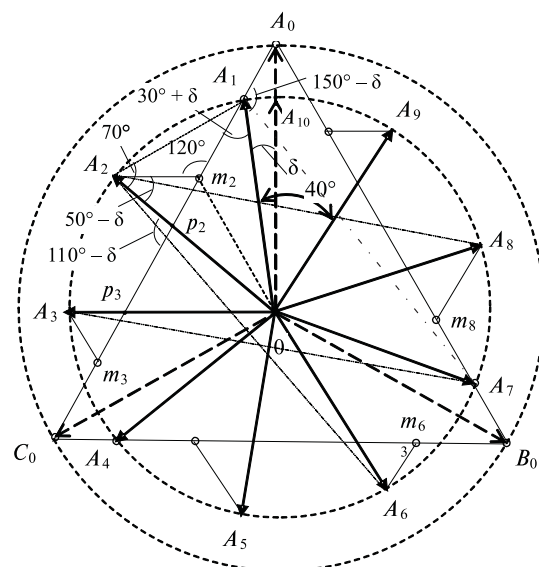
Приведенная на рис. 1 АТВУ-18 выполнена на трехфазном магнитопроводе с шестью секциями (обмотками) на каждом стержне и с 12 выводами от этих обмоток. Таким образом, всего в АТВУ-18 содержится 18 обмоток с 36 выводами. Заметим,



**Рис. 1.** Принципиальная электрическая схема ПТВУ-18 (рисунок содержит небольшую условность, допущенную из соображений более удобного его начертания: точки 5, 8, 11, строго говоря, должны лежать на одной окружности с точками 6, 7, 9, 10, 12, 13. Это подчеркивают точки 5ϕ, 8ϕ, 11ϕ – аналоги точек 5, 8, 11.)

что чрезмерно большое число выводов является конструкторско-технологическим недостатком этого решения.

**Методика определения проектно необходимых параметрических соотношений для АТВУ-18.** *Общий принцип формирования 9-фазной системы векторов (первый этап исследования).* На этом этапе будем придерживаться предположения, что выпрямленное 18-пульсное напряжение  $u_d(t)$  в схеме на рис. 1 формируется в результате двухполупериодного выпрямления симметричной 9-фазной системы линейных напряжений (одно из них представлено вектором  $A_1 A_7$ ), которые сдвинуты последовательно относительно друг друга на угол  $2\pi/9$  и формируются из 9 фазных напряжений (назовем их виртуальными), которые представлены на рис. 2 векторами  $A_1 - A_9$ .



**Рис. 2.** Векторная диаграмма, поясняющая принцип формирования симметричной 9-фазной системы напряжений при выполнении АТВУ-18 в варианте понижения исходного напряжения

Таким образом, на первом этапе анализа в качестве исходной 3-фазной системы напряжений, представленной на векторной диаграмме рис. 2 (виртуальными) фазными –  $A_0 0, B_0 0, C_0 0$ , и линейными –  $A_0 B_0, C_0 A_0, B_0 C_0$ , векторами соответственно, используются не фазные –  $U_{A_0 0}, U_{B_0 0}, U_{C_0 0}$ , а линейные –  $U_{A_0 B_0}, U_{C_0 A_0}, U_{B_0 C_0}$ , напряжения (т.е. векторы  $A_0 B_0, C_0 A_0, B_0 C_0$ , соединенные по схеме «треугольник»). Заметим, что использование в данном решении АТВУ-18 исходной схемы обмоток именно с топологией «треугольник» определяет собой лишь один из известных способов формирования многофазной системы напряжений, который не является единственным.

Для решения поставленной задачи удобно использовать именно фазные векторы 9-фазной системы (о чем уже вскользь упомянуто выше). В качестве примера мысленно выделим один (из трех) треугольник линейных векторов,  $A_1 A_7 - A_4 - A_1 - A_7 A_4$ , формируемых из фазных векторов  $A_1, A_4, A_7$  (чтобы не усложнять рис. 2, на нем показан штрихпунктирной линией лишь один линейный вектор  $A_1 A_7$ ). Каждый из девяти фазных векторов, кроме первого  $A_1$ , формируется из фрагментов (частей) двух векторов, принадлежащих двум определенным линейным векторам. Например, фазный вектор  $A_2$  формируется из фрагмента (отрезка), принадлежащего линейному вектору  $C_0 A_0$ , и фрагмента,  $A_2 m_2$ , коллинеарного с линейным вектором  $B_0 C_0$ .

Задачей следующего анализа является определение длины отрезков (модулей) векторов, из которых формируется каждый из 9 векторов. На самом деле здесь ввиду полной симметрии процессов формирования векторов в трех группах ( $A_1 - A_3, A_4 - A_6, A_7 - A_9$ ) достаточно решить эту задачу только для одной группы из 3 векторов, например для  $A_1 - A_3$ . При этом задача сводится к определению длины отрезков  $A_0 A_1, A_1 m_2, C_0 m_3$  на линейном векторе  $C_0 A_0$  и длины отрезков обособленных векторов  $A_2 m_2$  и  $A_3 m_3$ , коллинеарных с векторами  $B_0 C_0$  и  $A_0 B_0$  соответственно.

**Отрезок  $A_0 A_1$ .** Здесь задача решается на основе расчета параметров треугольника  $D_0 A_0 A_1$ , в котором известны две стороны  $A_0 0$  и  $A_1 0$  и три угла:  $\angle A_1 A_0 0 = 30^\circ$ ,  $\angle A_0 0 A_1 = d$ ,  $\angle 0 A_1 A_0 = 150^\circ - d$ . Угол  $d$  однозначно определяется коэффициентом трансформации базовой обмотки автотрансформатора (АТВ):

$$K_{\text{АТВ}} = A_1 0 / A_0 0, \quad (1)$$

который должен быть задан, точнее, определен в процессе анализа. В данном случае, как показано ниже, требуется небольшое снижение исходного напряжения. Расчетное соотношение для отрезка

$A_1 A_0$  найдем, используя отрезок  $A_1 0$  и теорему синусов:

$$\frac{A_0 A_1}{\sin d} = \frac{A_1 0}{\sin 30^\circ}; \quad A_0 A_1 = \frac{\sin d}{\sin 30^\circ} A_1 0 = 2 A_1 0 \sin d. \quad (2)$$

Аналогичным образом определим этот же отрезок через исходный вектор  $A_0 0$ :

$$\frac{A_0 A_1}{\sin d} = \frac{A_0 0}{\sin(150^\circ - d)}; \quad A_0 A_1 = \frac{\sin d}{\sin(150^\circ - d)} A_0 0. \quad (3)$$

Подставив значение  $A_0 A_1$  из (2) в (3), получим:

$$2 A_1 0 \sin d = \frac{\sin d}{\sin(150^\circ - d)} A_0 0; \quad \frac{A_0 0}{2 A_1 0} = \sin(150^\circ - d);$$

$$K_{\text{АТВ}} = 2 \sin(150^\circ - d). \quad (4)$$

Конечное выражение (4) представим в таком виде:

$$K_{\text{АТВ}} = 2(\sin 150^\circ \cos d - \cos 150^\circ \sin d); \quad (5)$$

$$K_{\text{АТВ}} = \cos d + \sqrt{3} \sin d.$$

Полученное выражение является трансцендентным и относительно аргумента  $d$  решается численным способом, если определен коэффициент  $K_{\text{АТВ}}$ .

*Определение значения коэффициента  $K_{\text{АТВ}}$ .* При анализе там, где это целесообразно, для упрощения будем оперировать значениями модулей векторов и их соотношениями, полагая при этом, что полученные результаты адекватно отражают и аналогичные результаты для соответствующих напряжений (переход от одной меры к другой осуществляется путем замены длины векторов на значения напряжений).

Определим взаимосвязь между заданным в данном случае значением постоянной составляющей  $U_{d0} = 270$  В и требуемым амплитудным значением линейного напряжения на входе 9-фазного диодного моста  $U_{\text{лм}}$ . На векторной диаграмме величина  $U_{\text{лм}}$  представлена линейным вектором  $A_1 A_7$ .

1. Параметры исходной сети. Действующие значения напряжений:  $U_{\text{ф}}^0 / U_{\text{л}}^0 = 115,5 / 200$  В с частотой 400 Гц. Более точное значение фазного напряжения (115,5 В, а не 115 В) взято из соображений учета с большей точностью соотношения между линейным и фазным напряжениями, которое должно быть равно  $\sqrt{3}$ , что важно при последующем анализе. Амплитудные значения исходных фазного и линейного напряжений равны для схемы «треугольника»:

$$U_{\text{фм}}^0 / U_{\text{лм}}^0 = 163,3 / 282,84. \quad (6)$$

2. Определение постоянной составляющей. Дальнейшая логика исследования строится на предположении, что в каждый данный момент из 18 диодов моста работают только два и постоянная составляющая напряжения на выходе АТВУ (без учета падения на диодах) равна

$$U_{d0}^0 = \frac{18}{\rho} \sin \frac{\rho}{18} U_{лм} = 0,9949 U_{лм} \gg 0,995 U_{лм} = 281,4 \text{ В.} \quad (7)$$

С учетом падения напряжения на двух диодах (по  $DU_{VD} = 0,7 \text{ В}$  на каждом) находим

$$U_{d0}^{\text{д}} = 281,4 - 1,4 = 280 \text{ В.} \quad (7a)$$

Нам же по техзаданию необходимо  $U_{d0}^{\text{д}} = 270 \text{ В}$ .

Известно, что такой двухвентильный режим работы рассматриваемого типа ТВУ (без трансфильтров [5, 6]) приводит к увеличению габаритной мощности трансформатора и к росту потерь в диодах. Для исключения этого энергетически невыгодного режима в ТВУ, как известно [5, 6], используют трансфильтры в выходной цепи. Однако приемлемо ли данное решение в исследуемом АТВУ – это еще подлежит исследованию.

3. Требуемые в данном применении параметры АТВУ-18.

3.1. Итак, требуемое (в данном случае) значение постоянной составляющей на выходе моста:

$$U_{d0} = 270 \text{ В.} \quad (8)$$

3.2. Тогда согласно (7) требуемое значение амплитудного линейного напряжения (без учета падения на диодах) будет равно:

$$U_{лм} = U_{d0} / 0,995 = 271,4 \text{ В,} \quad (9)$$

а с учетом падения напряжения на двух диодах  $2DU_{VD} = 2 \cdot 0,7 = 1,4 \text{ В}$ :

$$U_{лм}^{\text{д}} = 272,8 \text{ В.} \quad (9)$$

Амплитудные значения фазного напряжения (без учета падений напряжений на диодах и с их учетом) соответственно равны:

$$U_{фм} = U_{лм} / \sqrt{3} = 156,7 \text{ В;} \quad (10)$$

$$U_{фм}^{\text{д}} = U_{лм}^{\text{д}} / \sqrt{3} = 157,5 \text{ В.} \quad (10 \text{ а})$$

4. Определение коэффициента трансформации. Таким образом, нужно получить автотрансформаторным путем 9 требуемых линейных (или 9 фазных) напряжений из трех исходных ли-

нейных  $U_{лм}^0 = 282,84 \text{ В}$  (или из трех фазных  $U_{фм}^0 = 163,3 \text{ В}$ ) путем их соответствующего понижения:

линейных напряжений (без учета падений напряжения на диодах) на

$$DU_{лм} = 282,84 - 271,4 = 11,44 \text{ В,} \quad (11)$$

а с учетом падений напряжения на диодах на меньшее значение:

$$DU_{лм}^{\text{д}} = 282,84 - 272,8 = 10,04 \text{ В;} \quad (11a)$$

фазных напряжений на

$$DU_{фм} = 163,3 - 156,7 = 6,6 \text{ В,} \quad (12)$$

а с учетом падений напряжения на диодах на

$$DU_{фм}^{\text{д}} = 163,3 - 157,5 = 5,8 \text{ В.} \quad (12a)$$

Тогда искомый коэффициент  $K_{АТВ}$  равен:

$$K_{АТВ} = 163,3 / 157,5 = 1,0368. \quad (13)$$

Подставив это значение в уравнение (5) и решив его численным способом, найдем искомый угол  $\alpha = 1,225^\circ$ . Далее, зная значения векторов  $A_0$  (163,3 В) и  $A_1$  (157,5 В), а также все необходимые углы в тех треугольниках, в которые входят искомые отрезки, находим длину этих отрезков (в вольтах). После определения их длины определяем соответствующий каждому отрезку коэффициент трансформации относительно исходного линейного вектора ( $A_0 C_0$  в данном случае). Зная эти коэффициенты, можно найти необходимые для проведения имитационного компьютерного моделирования (ИКМ) значения главных индуктивностей всех его обмоток. Полученные таким образом результаты были использованы при ИКМ АТВУ-18 с выходной мощностью  $P_{d0} = 7290 \text{ Вт}$ .

Результаты моделирования полностью подтвердили ожидаемую его функциональную характеристику – формы кривых выпрямленного напряжения и потребляемого тока полностью качественно соответствуют проектному замыслу. Вместе с этим было выявлено несоответствие значений амплитуд линейных напряжений на определенных входах моста  $U_{фм}$  и ожидаемого максимального значения выпрямленного напряжения  $U_{дм}$  (на определенных входах  $U_{фм} < U_{дм}$ ), что потребовало дополнительного детального исследования процессов в АТВУ-18, пересмотра первоначальной версии формирования выпрямленного напряжения и, в конечном счете, проведения коррекции коэффициента  $K_{АТВ}$ . Именно по этой причине изложенный выше алгоритм анализа в более детальном представлении (с

приведением расчетов) и в откорректированном виде приведен ниже (не после первого этапа исследования, а именно после второго).

Анализ выявленного свойства АТВУ-18, потребовавшего коррекции методики расчета его параметров (второй этап исследования). Итак, результаты предварительного ИКМ показали, что рассматриваемая автотрансформаторная схема выпрямления (относительно вышеиспользованной традиционной логики анализа) обладает «свойством» повышения напряжения. Например, при амплитудном значении исходного линейного напряжения  $U_{лм} = 282,84$  В и амплитудном линейном напряжении (принадлежащем одной трехфазной системе) на входе выпрямителя  $U_{фм} = 270$  В (при номинальной нагрузке) максимальное значение  $U_{dm}$  выпрямленного напряжения  $u_d(t)$  оказалось равным  $U_{dm} = 305$  В, т.е. больше амплитуды входного линейного напряжения моста  $U_{фм}$  в  $305/270 = 1,1296$  раз. Следовательно, чтобы получить требуемое значение выпрямленного напряжения  $U_{d0} = 270$  В, подаваемое на вход моста, линейное напряжение должно быть снижено до  $U_{фм} = 270 В / 1,1296 = 239$  В, т.е. коэффициент  $K_{АТВ}$  должен быть установлен равным:

$$K_{АТВ} = 282,84 / 239 = 1,1834, \quad (14)$$

а угол  $d$  должен быть пересчитан. Заметим, что полученное на основе ИКМ значение  $K_{АТВ}$  далее еще будет уточнено аналитическим способом.

Найденное объяснение этому «свойству» заключается в следующем.

Оказывается, что согласно векторной диаграмме на рис. 2 в ней имеются еще другие большие по модулю линейные векторы (например, вектор  $A_2 A_6 > A_1 A_7$  и вектор  $A_3 A_7 > A_2 A_8$ ) — назовем их линейными векторами второго типа. Всего их также 9, как и линейных векторов первого типа. Они образованы двумя фазными векторами, сдвинутыми между собой на угол  $8\pi/9$  (а не на угол  $2\pi/3$ ). Выпрямленное напряжение  $u_d(t)$  формируется именно из фрагментов векторов второго типа.

С помощью векторной диаграммы на рис. 1 можно определить, во сколько раз модуль вектора второго типа больше модуля вектора первого типа. Используя теорему синусов, отрезок (модуль вектора)  $A_1 A_6$  определим из треугольника  $DA_2 O A_6$ :

$$\frac{A_2 O}{\sin 10^\circ} = \frac{A_2 A_6}{\sin 160^\circ};$$

$$A_2 A_6 = \frac{\sin 160^\circ}{\sin 10^\circ} A_2 O = 1,9696 A_2 O, \quad (15)$$

отрезок  $A_1 A_7$  — из треугольника  $DA_1 O A_7$ :

$$\frac{A_1 O}{\sin 30^\circ} = \frac{A_1 A_7}{\sin 120^\circ};$$

$$A_1 A_7 = \frac{\sin 120^\circ}{\sin 30^\circ} A_1 O = 1,7320 A_1 O. \quad (16)$$

Отношение модулей векторов второго и первого типов характеризует откорректированную часть коэффициента трансформации АТВ, равную:

$$K_{АТВ}^{\phi} = A_2 A_6 / A_1 A_7 = 1,1372. \quad (17)$$

Таким образом, в результирующем коэффициенте трансформации АТВ необходимо также учесть уже ранее полученное его значение, равное  $K_{АТВ} = 1,0368$ :

$$K_{АТВ}^S = K_{АТВ} K_{АТВ}^{\phi} = 1,1790. \quad (18)$$

Полученное в (18) значение  $K_{АТВ}^S$  будем считать более точным, чем определенное по (14), хотя их разница ничтожна и составляет:

$$DK_{АТВ} = (1,1834 - 1,179)100\% / 1,179 = 0,37\%. \quad (19)$$

Определение модулей искоемых векторов (длины отрезков) с учетом откорректированного значения коэффициента трансформации (продолжение анализа). Найдем откорректированное значение угла  $d$  в соответствии с выражением (5):

$$1,1834 = \cos d + \sqrt{3} \sin d. \quad (5a)$$

Из решения этого уравнения (с точностью до четвертого знака после запятой) определяем, что значение угла  $d = 6,28^\circ$ . После этого, используя (3), найдем модуль вектора  $A_0 A_1$ :

$$A_0 A_1 = \frac{\sin d}{\sin(150^\circ - d)} A_0 O = \frac{\sin 6,28^\circ}{\sin 143,72^\circ} A_0 O = 0,18486 A_0 O. \quad (20)$$

Отрезки  $A_2 p_2$ ,  $A_2 p_2$ ,  $p_2 m_2$ . Длину этих отрезков найдем из треугольника  $DA_2 p_2 m_2$  (рис. 2). Однако при известности всех трех углов длина ни одной из его сторон не известна. Используя возможность определения длины отрезка  $p_2 O$  из треугольника  $DA_0 p_2 O$ , найдем длину его стороны  $A_2 p_2$  из равенства

$$A_2 p_2 = A_2 O - p_2 O.$$

Таким образом, найдя из треугольника  $DA_0 p_2 O$  длину отрезка  $p_2 O$

$$\frac{p_2 O}{\sin 30^\circ} = \frac{A_0 O}{\sin(110^\circ - d)};$$

$$p_2 0 = \frac{\sin 30^\circ}{\sin(110^\circ - 6,28^\circ)} A_0 0 = 0,51468 A_0 0,$$

найдем далее и длину отрезка  $A_2 p_2$ :

$$\begin{aligned} A_2 p_2 &= A_2 0 - 0,51468 A_0 0 = \\ &= A_0 0(1 / K_{\text{ATV}}^S - 0,51468) = 0,3335 A_0 0. \end{aligned}$$

Длина отрезка  $A_2 m_2$  определяется из соотношения:

$$\frac{A_2 m_2}{\sin(70^\circ + d)} = \frac{A_2 p_2}{\sin 60^\circ};$$

$$A_2 m_2 = \frac{\sin(70^\circ + 6,28^\circ)}{\sin 60^\circ} A_2 p_2 = 1,12175 A_2 p_2 = 0,3741 A_0 0.$$

Из этого же треугольника  $\Delta A_2 p_2 m_2$  с использованием уже найденной длины стороны  $A_2 p_2$  определяется длина отрезка  $p_2 m_2$ :

$$\begin{aligned} \frac{p_2 m_2}{\sin(50^\circ - d)} &= \frac{A_2 p_2}{\sin 60^\circ}; \\ p_2 m_2 &= \frac{\sin(50^\circ - 6,28^\circ)}{\sin 60^\circ} 0,3335 A_0 0 = 0,2662 A_0 0. \end{aligned}$$

**Отрезок  $A_1 m_2$ .** Длину можно определить из равенства:

$$A_1 m_2 = A_0 p_2 - p_2 m_2 - A_0 A_1,$$

предварительно найдя из треугольника  $\Delta A_2 p_2 m_2$  длину его стороны  $A_0 p_2$ :

$$\begin{aligned} \frac{A_0 p_2}{\sin(40^\circ + d)} &= \frac{A_0 0}{\sin(110^\circ - d)}; \\ A_0 p_2 &= \frac{\sin(40^\circ + 6,28^\circ)}{\sin(110^\circ - 6,28^\circ)} A_0 0 = 0,74395 A_0 0. \end{aligned}$$

Поскольку длина отрезков  $p_2 m_2$  и  $A_0 A_1$  уже определена, то длина искомого отрезка также находится по выражению

$$A_1 m_2 = A_0 p_2 - p_2 m_2 - A_0 A_1 = 0,29289 A_0 0.$$

**Отрезок  $A_3 m_3$ .** Значение его длины определяется из треугольника  $\Delta A_3 p_3 m_3$ , в котором все три угла легко находятся, однако при этом длина ни одной из его сторон не известна. Длину его стороны  $A_3 p_3$  можно определить из равенства

$$A_3 p_3 = A_3 0 - p_3 0.$$

Длина отрезка  $p_3 0$  находится из треугольника  $\Delta A_0 p_3 0$ :

$$\frac{p_3 0}{\sin 30^\circ} = \frac{A_0 0}{\sin(70^\circ - d)};$$

$$p_3 0 = \frac{\sin 30^\circ}{\sin(70^\circ - 6,28^\circ)} A_0 0 = 0,55764 A_0 0,$$

что дает возможность определить длину отрезка  $A_3 p_3$ :

$$\begin{aligned} A_3 p_3 &= A_3 0 - p_3 0 = A_0 0 / K_{\text{ATV}}^S - p_3 0 = \\ &= A_0 0(1 / 1,179 - 0,55764) = 0,2905 A_0 0. \end{aligned}$$

Возвращаясь к треугольнику  $\Delta A_3 p_3 m_3$ , находим длину отрезков  $A_3 m_3$  и  $p_3 m_3$ :

$$\begin{aligned} \frac{A_3 m_3}{\sin(70^\circ - d)} &= \frac{A_3 p_3}{\sin 60^\circ}; \\ A_3 m_3 &= \frac{\sin(70^\circ - 6,28^\circ)}{\sin 60^\circ} A_3 p_3 = 0,30077 A_0 0; \\ \frac{p_3 m_3}{\sin(50^\circ + d)} &= \frac{A_3 p_3}{\sin 60^\circ}; \\ p_3 m_3 &= \frac{\sin(50^\circ + 6,28^\circ)}{\sin 60^\circ} A_3 p_3 = 0,27901 A_0 0. \end{aligned}$$

**Отрезок  $C_0 m_3$ .** Длину этого отрезка определяем из равенства

$$C_0 m_3 = A_0 C_0 - A_0 p_3 - p_3 m_3,$$

где длину неизвестного отрезка  $A_0 p_3$  найдем из треугольника  $\Delta A_0 p_3 0$ :

$$\begin{aligned} \frac{A_0 p_3}{\sin(80^\circ + d)} &= \frac{A_0 0}{\sin(70^\circ - d)}; \\ A_0 p_3 &= \frac{\sin(80^\circ + 6,28^\circ)}{\sin(70^\circ - 6,28^\circ)} A_0 0 = 1,11292 A_0 0. \end{aligned}$$

С учетом того, что  $A_0 C_0 = \sqrt{3} A_0 0$ , длина искомого отрезка будет равна:

$$C_0 m_3 = \sqrt{3} A_0 0 - 1,11292 A_0 0 - 0,27901 A_0 0 = 0,3401 A_0 0.$$

**Отрезок  $m_2 m_3$ .** Знания длины этого отрезка для проектирования ATV не требуется. Однако оно необходимо для проведения ИКМ. Его длина может быть определена из следующего равенства:

$$\begin{aligned} m_2 m_3 &= A_0 C_0 - (C_0 m_3 + A_0 A_1 + A_1 m_2) = \sqrt{3} A_0 0 - \\ &- 0,3401 A_0 0 - 0,18486 A_0 0 - 0,29289 A_0 0 = 0,9142 A_0 0. \end{aligned}$$

Результаты определения соотношений между исходным фазным напряжением и напряжениями секций обмоток в относительных единицах, полученные на основе векторной диаграммы рис. 2, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование отрезка $l_j$	Длина отрезка в долях длины		Относительная длина $j$ -го отрезка $l_j$ в долях длины отрезка $A_0C_0$
	фазного вектора $A_0O$	линейного вектора $A_0C_0$	
$A_0A_1$	0,18486	0,10673	9,37
$A_1m_2$	0,29289	0,16910	5,91
$m_2m_3$	0,34010	0,52781	1,89
$C_0m_3$	0,3410	0,19636	5,09
$A_2m_2$	0,37410	0,21599	4,63
$A_3m_3$	0,30071	0,17361	5,76

В качестве одного из критериев самоконтроля результатов анализа можно использовать известное соотношение длины исходных фазных и линейных векторов (отрезков). С одной стороны, должно выполняться условие

$$A_0C_0 = \sqrt{3}A_0O,$$

с другой стороны, из диаграммы рис. 2 следует равенство

$$A_0C_0 = (A_1A_0 + A_1m_2 + m_2m_3 + C_0m_3) = 1,73205A_0O.$$

Выполнение с высокой точностью соотношения  $\sqrt{3}$  между значениями линейного и фазного напряжений свидетельствует об отсутствии ошибок в вычислениях. В табл. 1 приведены также кратности длины  $j$ -го отрезка  $l_j$  относительно длины отрезка  $A_0C_0$ :

$$K_{\text{ATV}(j)} = \frac{A_0C_0}{l_j}.$$

Этот показатель отражает коэффициент трансформации секций автотрансформатора относительно линейного напряжения ( $U_{A_0C_0}$ ).

Действующие значения токов в секциях ATV (в долях тока нагрузки  $I_{d0}$ ). Для завершения методики проектирования ATV необходимо также знать еще и действующие значения токов во всех его обмотках-секциях. В ATV-18 их число равно 18. Токи этих секций различаются как по форме их кривых, так и по их действующим значениям. Чрезмерно большое число взаимосвязей между ними, определяемых десятками уравнений, делает решение этой задачи традиционным аналитическим путем крайне сложным, более того, не только не рациональным, но и, как нам представляется, практически трудно реализуемым. Единственным средством ее решения является использование возможностей имитационного компьютерного моделирования (ИКМ). Промежуточными результатами ИКМ мы уже выше воспользовались, а окончательные результа-

Таблица 2

Обмотка ATV	Действующее значение		Габаритная мощность обмоток одной фазы, ВА
	напряжения на обмотке, В	тока в обмотке, А	
$A_0A_1$	20,80	14,69	305,552
$A_1m_2$	33,90	8,61	291,879
$m_2m_3$	105,10	6,43	675,793
$C_0m_3$	39,27	11,52	452,390
$A_2m_2$	42,90	12,70	544,839
$A_3m_3$	34,70	12,70	440,690

Примечания: суммарная габаритная мощность обмоток ATV одной фазы составила  $S_{\text{ATV}(1)} = (1/2) \cdot 2711,143 = 1355,57$  ВА; габаритная мощность ATV  $S_{\text{ATV}(3)} = 3S_{\text{ATV}(1)} = 4066,71$  ВА; выходная мощность ATV-18  $P_{d0} = 7230$  Вт; относительная габаритная мощность ATV (в долях  $P_{d0}$ , Вт)  $S_{\text{ATV}}/P_{d0} = 0,5625$ .

ты решения поставленной задачи этим путем представлены осциллограммами процессов на рис. 3 и 4, а также обработанными данными табл. 1 и 2:

Обмотка	$A_0A_1$	$A_1m_2$	$m_2m_3$	$C_0m_3$	$A_2m_2$	$A_3m_3$
Ток обмотки в долях тока нагрузки $I_{d0}$	0,544	0,319	0,238	0,427	0,470	0,470

Заметим, что при ИКМ использованы общепринятые допущения: нелинейность магнитопровода ATV не учитывалась, а индуктивности рассеяния его обмоток принимались равными нулю. На этапе структурно-алгоритмического синтеза (первый этап проектирования) эти допущения оправданы, а само моделирование характеризуется как макромоделирование. На этапе параметрической оптимизации эти допущения, разумеется, должны быть сняты.

Коэффициент гармоник потребляемого ATV-18 из сети тока равен примерно 10%. Результат получен на основе ИКМ и аналитическим путем в [6]. Активная мощность, потребляемая из сети (рис. 3), определялась на основе ИКМ по формуле

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{u}_1(t) i_1(t) dt. \quad (21)$$

Аналогичным путем определялась и выходная мощность  $P_{d0}$  (рис. 3).

Габаритная мощность ATV как оценочный массогабаритный показатель. Рассматриваемое здесь решение ATV-18 не является единственным. Оно взято лишь в качестве примера для иллюстрации имеющегося в силовой преобразовательной технике множества задач повышенной сложности, для решения которых требуются нетрадиционные под-

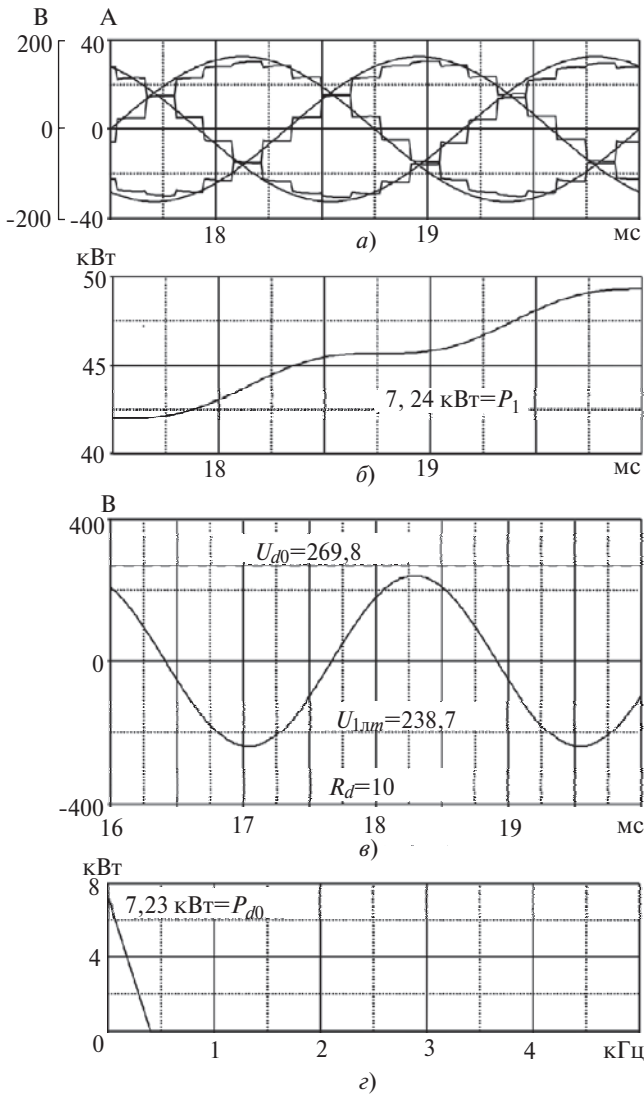


Рис. 3. Полученные на основе моделирования процессов в АТВУ-18: а – осциллограммы сетевых фазных напряжений и потребляемых из сети токов; б – осциллограмма интегрального произведения мгновенных значений сетевых фазных напряжения и тока, поясняющая процедуру определения на основе ИКМ потребляемой из сети активной мощности согласно выражению (21); в – осциллограммы выпрямленного 18-пульсного напряжения и мгновенного значения линейного напряжения исходной симметричной 9-фазной системы напряжений; г – спектрограмма мгновенного значения выходной мощности АТВУ-18

ходы. На самом деле при грамотном подходе к процедуре проектирования должны рассматриваться и оцениваться по заданным критериям проектирования несколько альтернативных (конкурирующих) вариантов. Таким образом, на первом этапе проектирования необходимо решать и задачу обоснованного выбора лучшего решения (из нескольких). В данном классе устройств в качестве оценочного критериального показателя целесообразно использовать габаритную мощность ATV [4]. Он дает однозначное представление о массогабаритном показателе ATV и определяется следующим образом:

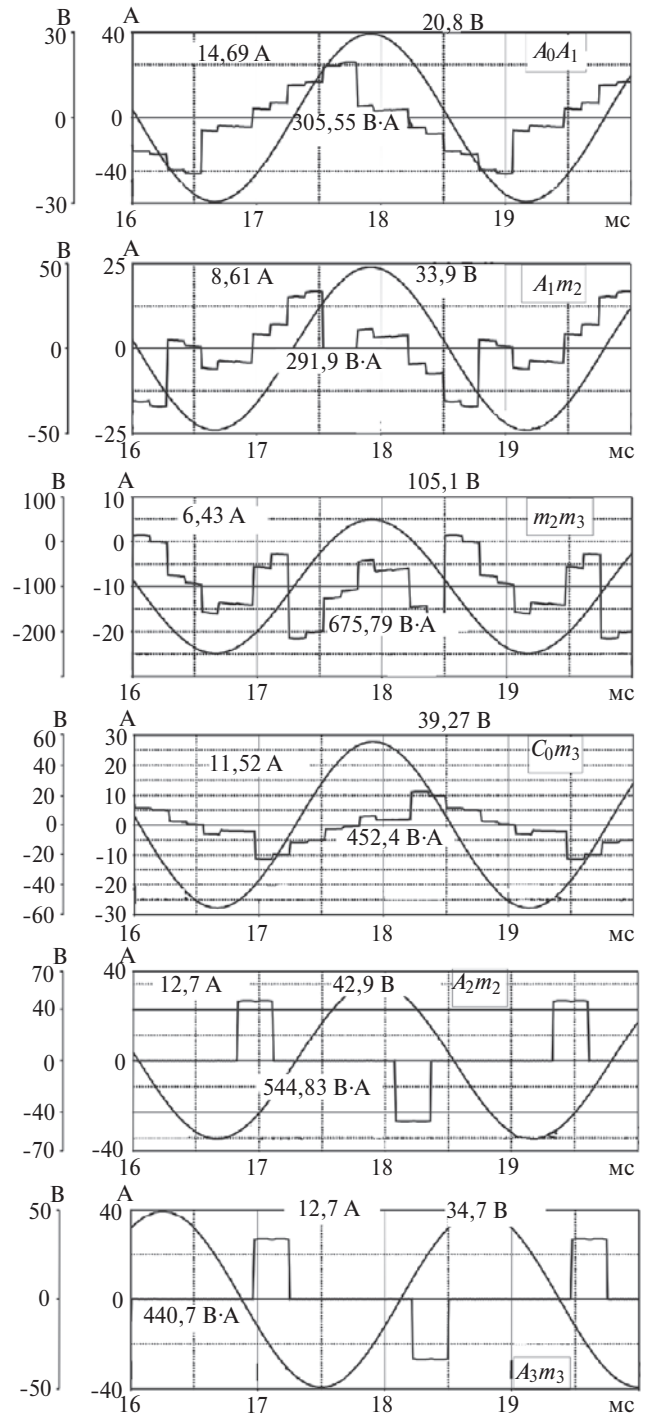


Рис. 4. Осциллограммы напряжений и токов в секциях-обмотках, расположенных на одном стержне трехфазного магнитопровода; указанные на осциллограммах наименования секций соответствуют наименованиям векторов на векторной диаграмме рис. 2

$$S_{\Gamma} = \frac{3}{2} \sum_{j=1}^N U_j I_j,$$

где  $U_j, I_j$  – действующее значение напряжения и тока  $j$ -й обмотки ATV, расположенной на одном стержне трехфазного магнитопровода, а  $N$  – число этих обмоток.



**Выводы.** 1. Трехфазное автотрансформаторно-выпрямительное устройство с пульсностью выпрямленного напряжения  $m_{1\Omega} = 18$  (АТВУ-18) относится к классу топологически сложных систем, с трудно поддающимися модельному временному описанию токами в секциях обмоток, что делает невозможной реализацию процедуры оперативного его проектирования. Наиболее рациональным путем решения этой задачи является имитационное компьютерное моделирование (ИКМ).

2. На основе ИКМ (в среде PSpice Schematics) получена вся необходимая для проектирования АТВУ-18 информация. Коэффициенты трансформации секций обмоток относительно базовой обмотки с топологией «треугольник» (подключаемой к сети) определены аналитическим путем. В принципе задача решается и на основе ИКМ, что и было сделано. Однако, если аналитическое решение этой задачи достаточно простое, как в данном случае, то оно имеет очевидное преимущество.

3. Возможная топологическая вариантность АТВУ при одной и той же пульсности  $m_{1\Omega}$  приводит к необходимости сопоставительной оценки альтернативных решений. В качестве оценочного критериального показателя целесообразно использовать габаритную мощность автотрансформатора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вотчицев Г.М., Иньков Ю.М.** Многофазные преобразователи частоты с естественной коммутацией тока. – Тр. ВЭИ, вып. 75: Силовые полупроводниковые устройства. – М.: Энергия, 1967.

2. **Патент №5 455 759 (США).** Symmetrical, Phase-shifting, Fork Transformer/Derek A. Paice. – Оpubл. 03.10.1995.

3. **Huiyu Zhu.** Nev Multi-Pulse Diode Rectifier Average Models for AC and DC Power Systems Studies: Dissertation... Doctor of Philosophy in Elektrical Engineering, Blacksburg, Virginia, 13.12.2005.

4. **Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г.** Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973.

5. **Мызык Г.С., Берилов А.В., Михеев В.В.** Поисковое проектирование устройств силовой электроники (Трансформаторно-полупроводниковые устройства): Учебное пос. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010.

6. **Мызык Г.С.** Основы теории структурно-алгоритмического синтеза источников вторичного электропитания. – М.: Изд. МЭИ, 1989.

[12.12.11]

*Авторы: **Коняхин Сергей Федорович** окончил электромеханический факультет (ЭМФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1984 г. Защитил в МЭИ в 2009 г. кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка бортовых трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом». Генеральный конструктор ОАО «АКБ «Якорь».*

***Михеев Владимир Викторович** окончил ЭМФ МЭИ в 1978 г. Зам. начальника отдела вторичных источников питания ОАО «ГОКБ «Прожектор».*

***Мызык Геннадий Сергеевич** окончил ЭМФ МЭИ в 1964 г. Защитил в МЭИ в 2001 г. докторскую диссертацию «Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа малоискажающих устройств силовой электроники для электротехнических комплексов автономных объектов». Профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» «НИУ«МЭИ».*

\* \* \*

## ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru