

Ю. П. ГОНЧАРОВ, Н. В. ПАНАСЕНКО, В. В. ЗАМАРУЕВ, В. В. ИВАХНО,  
С. Ю. КРИВОШЕЕВ, Ю. В. ЧУРСИНА, Н. В. ДАНИЛОВ (НТУ «ХПИ», Харьков),  
В. Г. СЫЧЕНКО, В. Ю. ИВАНОВ (ДИИТ)

## СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПИТАНИЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЗВЕНОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Розглянуто систему розподіленого живлення контактної мережі постійного струму від високовольтної поздовжньої лінії з частотою напруги порядку одиниць кГц, що дозволяє домогтися радикального скорочення маси силових електромагнітних елементів у перетворювачах і розширити можливості управління системою електропостачання.

*Ключові слова:* поздовжня кабельна лінія, підвищена частота, хвильове настроювання, маса силового обладнання, управління системою

Рассматривается система распределенного питания контактной сети постоянного тока от высоковольтной продольной линии с частотой напряжения порядка единиц кГц, позволяющая добиться радикального сокращения массы силовых электромагнитных элементов в преобразователях и расширить возможности управления системой электроснабжения.

*Ключевые слова:* продольная кабельная линия, повышенная частота, волновая настройка, масса силового оборудования, управление системой

The system under consideration is the PDU contact network of high-voltage direct current from the longitudinal line at the voltage of the order of units of kHz allowing to reduce drastically the mass of power electromagnetic elements in converters and to expand the opportunities of controlling the power supply system.

*Keywords:* longitudinal cable line, heightened frequency, wave setup, mass of power equipment, control over system

### 1. Постановка задачи работы

Как известно, система распределенного питания (СРП) содержит продольную линию электропередачи (ПЛ) с повышенным рабочим напряжением при большом расстоянии тяговых подстанций друг от друга и более часто расположенные пункты подпитки (ПП) основной контактной сети (КС) от продольной линии [1].

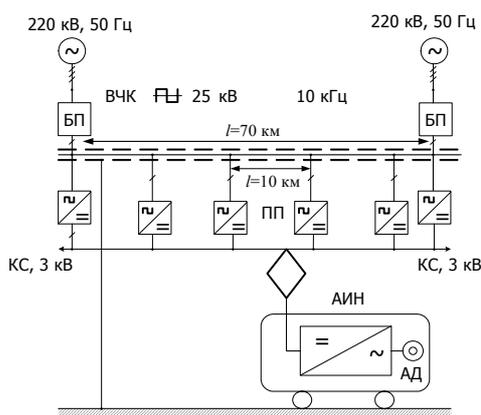


Рис. 1. Структура системы распределенного питания: ВЧК – высоковольтный высокочастотный кабель; АИН – автономный инвертор напряжения; АД – асинхронный тяговый двигатель

Основное достоинство СРП состоит в сокращении количества связей с ПС. В последние годы усиленно разрабатывается для дорог переменного тока вариант СРП с использованием в качестве ПЛ однофазного кабеля при его запитке синусоидальным напряжением 50...100 кВ, 50 Гц. ПП выполняется при этом на основе однофазного трансформатора, понижающего напряжение до величины 25 кВ в основной КС [2]. Если применить СРП для питания дороги постоянного тока, то на ПП, в дополнение к понижающему трансформатору необходимо установить однофазный выпрямитель с фильтром. Сохраняя отмеченное достоинство СРП, такая структура обладает, однако, следующими недостатками:

- несимметричная нагрузка фаз ПС;
- большая установленная мощность трансформатора и фильтров на ПП за счет низкой частоты  $f = 50$  Гц выпрямляемого напряжения.

Эти недостатки преодолеваются, если тяговая подстанция выполняется как вставка постоянного тока (ВПТ), с помощью которой формируется в ПЛ однофазное напряжение повышенной частоты  $f_n$  с формой, близкой к прямо-

угольной – меандру с ограниченным спектром (МОС) [3]. Общая структура СРП соответствует при этом рис. 1, а структура базового преобразователя (тяговой подстанции) – рис. 2.

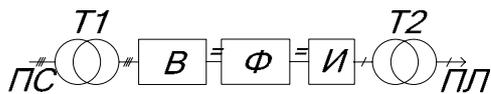


Рис. 2. Базовый преобразователь (тяговая подстанция) как вставка постоянного тока:  $T1$  и  $T2$  – питающий и нагрузочный трансформаторы;  $B$  – трехфазный выпрямитель;  $\Phi$  – фильтр в звене постоянного тока;  $I$  – однофазный инвертор

Ясно, что при идеальном сглаживании фильтра  $\Phi$  однофазный характер нагрузки не создает несимметрии в ПС при любой частоте  $f_n$ . При конечной мощности фильтра несимметрия также полностью устраняется, если соотношение между частотами  $f_n$  и  $f_c$  кратно трем. Причина состоит в том, что однофазный инвертор создает в звене постоянного тока гармоники с частотами кратными  $2f_n$ , т.е. с теми же частотами, что и трехфазный выпрямитель, симметрично нагружающий фазы сети. Установленная мощность трансформатора и фильтров на ПП сокращается за счет повышенной частоты  $f_n$ , а для фильтров также за счет прямоугольной формы выпрямляемого напряжения. Кроме того, при идеальном прямоугольнике соотношение между амплитудным и действующим значениями равно единице, в то время как для синусоиды оно равно  $\sqrt{2}$ . За счет этого сокращается в два раза установленная мощность полупроводниковых ключей, определяемая произведением амплитудных значений напряжения и тока, а также улучшается использованием изоляции кабеля.

Наличие нагрузочного трансформатора  $T2$  практически окупается за счет того, что использование питающего трансформатора возрастает до 100% против 68 в структуре без ВПТ. В перспективе, по мере совершенствования силовых полупроводниковых ключей, пригодных для применения в инверторе, нагрузочный трансформатор может быть исключен вовсе. ВПТ как регулируемый объект придает системе электроснабжения также ряд дополнительных преимуществ: расширяются возможности стабилизации напряжения и его регулирования с целью контроля уравнивающих токов через ПС, ограничиваются аварийные токи и др. [3].

Очень существенным для оценки эффективности предлагаемой структуры является тот факт, что установленная мощность ВПТ как

дополнительного узла системы в несколько раз меньше суммарной установленной мощности ПП как узлов, на которых получается экономия. Чтобы это показать, а также получить данные для последующей количественной иллюстрации, рассмотрим следующий пример. Пусть по линии проходят скоростные поезда с мощностью  $P_e = 8$  МВт каждый и требуется поддержать напряжение  $u_c$  на токоёмниках на уровне не менее 2900 В. По падению напряжения в КС худшим является вариант встречного разъезда двух скоростных поездов в середине участка длиной  $l_n$  между соседними ПП, которую примем равной 10 км (рис. 1)

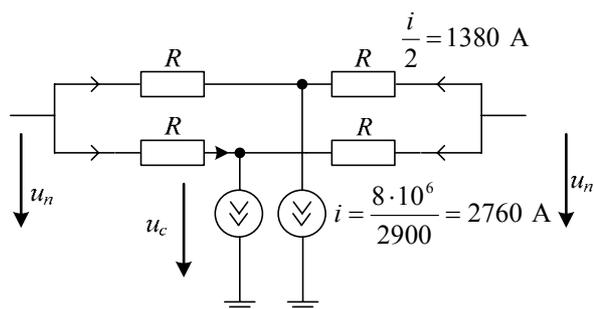


Рис. 3. К определению минимально необходимого напряжения  $u_n$  на выходе ПП

При использовании контактной подвески 2МФ100+М120 с суммарным поперечным сечением  $F_{np} = 320$  мм<sup>2</sup>, удельным сопротивлением  $\rho_n = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м и долей сопротивления рельсовой цепи 30% получаем полное сопротивление отрезка контактной сети на длине  $l_n/2$ , требуемое напряжение на выходе ПП и потребляемую мощность (рис. 3)

$$R = 1,3 \cdot \rho_n \cdot \frac{l_n}{F_{np}} \cong 0,35 \text{ Ом};$$

$$u_n = u_c + R \cdot \frac{i_n}{2} = 3380 \text{ В};$$

$$P'_b = 2 \cdot u_n \cdot i \cdot (1 + \Delta u^*) = 20,6 \text{ МВт}, \quad (1)$$

где  $\Delta u^*$  – относительное падение напряжения в кабеле, которое примем равным 0,1.

Последнюю величину можно связать с длиной  $l$  межподстанционной зоны и характеристиками кабеля

$$\Delta u^* = \frac{\Delta u}{U} = \frac{2\rho_n(l/2)j}{U}, \quad (2)$$

где  $U$  – действующее напряжение в кабеле, которое примем равным  $20 \cdot 10^3$  В;  $j$  – усредненная действующая плотность тока в кабеле, которую примем равной  $2 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

Коэффициент 2 в (2) учитывает, что в коаксиальном кабеле два проводника одинакового сечения (жила и оболочка), а деление длины зоны на два в числителе – что ее питание производится от двух подстанций. Из (2) получаем  $l = 60$  км. При числе  $n = 40$  пар скоростных поездов в сутки и их скорости  $v = 250$  км/час получаем среднюю мощность, потребляемую в зоне

$$P'_B = \frac{n}{24} \cdot P'_B \cdot \frac{l}{v} = 8,2 \text{ МВт}, \quad (3)$$

т.е. имеется еще более чем двукратный резерв на нескоростную составляющую движения. Суммарная установленная мощность ПП в абсолютных и относительных единицах

$$P_{\text{пп}} = 2P_e \frac{l}{l_n} = 96 \text{ МВт};$$

$$P_{\text{пп}}^* = \frac{P_{\text{пп}}}{P'_B} \cong 4,7, \quad (4)$$

где учтено, что максимальная мощность  $2P_e$  потребляется от одного ПП при встречном разъезде скоростных поездов непосредственно в месте расположения ПП.

Таким образом, действительно  $P_{\text{пп}}^* \gg 1$ , что значительно повышает эффект от применения ВПТ для повышения частоты напряжения в продольной линии. Однако повышенная частота и квазипрямоугольная форма напряжений и токов создают и ряд дополнительных проблем, из которых ключевыми являются следующие:

- значительно возрастает роль емкостных токов в кабельной ПЛ, в результате чего необходима разработка приемов их компенсации;
- возможно возникновение резонансных явлений в ПЛ, обусловленных емкостью и индуктивностью кабеля, что требует разработки специальных методов управления преобразователями.

Задача настоящей работы состояла в определении путей преодоления указанных проблем.

## 2. Режим полуволновой настройки

Он состоит в использовании такой частоты  $f = 1/T$  основной гармоники напряжения в кабельной ПЛ, чтобы на отрезке  $l_{\text{П}}$  между соседними ПЛ укладывалась одна полуволна напряжения

$$\frac{T}{2} = \frac{l_{\text{П}}}{V} = \tau; \quad V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_y C_y}}, \quad (5)$$

где  $V$  – скорость света в изоляции кабеля;

$L_y, C_y$  – относительная индуктивность и емкость кабеля на единицу длины;

$\tau$  – время распространения электромагнитной волны от одного края линии к другому. При использовании полиэтилена, имеющего относительную проницаемость  $\varepsilon = 2,3$  и  $l_{\text{П}} = 10$  км, из (5) получим  $f = 10^4$  Гц.

Режим полуволновой настройки системы распределенного питания обладает рядом достоинств:

- он соответствует достаточно высокой основной частоте, при которой размеры силовых электромагнитных элементов сокращаются примерно на порядок в сравнении с 50 Гц;

- нет индуктивного падения напряжения на отрезках между ПП и питающим преобразователем, так как оно полностью компенсируется емкостью кабеля; это позволяет применить на ПП неуправляемые выпрямители;

- малая чувствительность продольной линии как объекта с резонансными свойствами, к форме потребляемого тока и питающего напряжения

Последнее объясняется тем, что резонансные частоты полуволновой ЛЭП образуют ряд

$$\frac{1}{2}f, \frac{3}{2}f, \frac{5}{2}f \dots, \quad (6)$$

в то время как ряд нечетных гармоник, содержащихся в потребляемом токе и питающем напряжении, которые могли бы возбуждать резонансные явления в кабеле

$$f, 3f, 5f \dots \quad (7)$$

Как видно из сопоставления (6) и (7), возбуждающие гармоники располагаются в серединах отрезков между резонансными частотами и нигде не совпадают с ними.

Для обоснования количественных соотношений в режиме полуволновой настройки используем известные уравнения ЛЭП в операторной форме

$$U_1 = U_2 \text{ch}\gamma l + \rho \cdot I_2 \text{sh}\gamma l;$$

$$I_1 = I_2 \text{ch}\gamma l + \frac{1}{\rho} U_2 \text{sh}\gamma l, \quad (8)$$

где  $U_1, I_1, U_2, I_2$  – напряжения и токи на входе и выходе линии;  $\rho = \sqrt{L_y / C_y}$  – волновое сопротивление;  $\gamma$  – коэффициент распространения, определяемый при неучете активных сопротивлений следующей зависимостью:

$$\gamma l = p\sqrt{L_y C_y} l = p\sqrt{LC} = p \cdot \tau, \quad (9)$$

где  $L = L_y \cdot l$  и  $C = C_y \cdot l$  – полные значения индуктивности и емкости.

С учетом (9) уравнения (8) могут быть записаны следующим образом

$$U_1 = \frac{1}{2} e^{p\tau} (U_2 + \rho \cdot I_2) + \frac{1}{2} e^{-p\tau} (U_2 - \rho \cdot I_2);$$

$$I_1 = \frac{1}{2} e^{p\tau} (I_2 + \frac{U_2}{\rho}) + \frac{1}{2} e^{-p\tau} (I_2 - \frac{U_2}{\rho}), \quad (10)$$

где множители  $e^{p\tau}$  и  $e^{-p\tau}$  равносильны сдвигу аргумента (в скобках) как функции времени на время распространения  $\tau$  в сторону опережения или в сторону запаздывания.

В режиме полуволновой настройки имеем, согласно (5),  $\tau = T/2$ . Для рассматриваемой системы в установившемся режиме напряжения и токи содержат некоторый спектр только нечетных гармоник, то есть в отрицательный полупериод процессы повторяются с другим знаком. Сдвиг такого сигнала на  $T/2$  в любую сторону равносильно изменению знака сигнала, то есть в (10) можно заменить множители  $e^{\pm p\tau}$  на  $-1$ . Тогда получим

$$U_1 = -U_2; \quad I_1 = -I_2, \quad (11)$$

т.е. при полуволновой настройке напряжения и токи при переходе к соседней точке подключения ПП меняют знаки, сохраняя значения амплитуд и фаз. Следовательно, ни на одном из отрезков нет индуктивного падения напряжения. Поэтому полуволновый кабель дает жесткую внешнюю характеристику, наклон которой обусловлен только активными сопротивлениями.

### 3. Волновое сопротивление продольной линии

Волновое сопротивление  $\rho$  является вторым основным параметром системы, определяющим ее характеристики. Выполним анализ влияния  $\rho$ , полагая, что напряжение и ток в каждой из точек подключения к ПЛ являются некоторыми совокупностями нечетных гармоник и совпадают по форме и фазе. Оговорим амплитуды напряжения  $U_m$  и номинальной мощности  $P_{Nm} = U_m \cdot I_N$ , передаваемой по отрезку ПЛ. Введем в рассмотрение сопротивление номинальной нагрузки кабеля и представим волновое сопротивление в относительных единицах

$$R_N = \frac{U_m}{I_N}; \quad \rho^* = \rho / R_N. \quad (12)$$

Ток согласованной (натуральной) нагрузки, при которой фактическое сопротивление нагрузки отрезка равно волновому

$$I_H = \frac{U_m}{\rho} = \frac{I_N}{\rho^*}. \quad (13)$$

Рассмотрим распределение напряжения и тока по длине отрезка ПЛ при передаче некоторого фактического тока с амплитудой  $I_m$

$$I_m = (1 + \Delta i^*) \cdot I_H, \quad (14)$$

где  $\Delta i^*$  – относительное отличие фактического тока от натурального.

Для отыскания искомого распределения можно применить уравнения (10), понимая под  $\tau$  время распространения волны на длине между правым концом отрезка и текущей точкой на линии. При этом уравнения (10), будучи справедливыми для комплексных амплитуд каждой из гармоник сигналов напряжения и тока, справедливы и для сигналов в целом. Этот факт можно записать следующим образом

$$u(t) = \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \cdot e^{p\tau} \cdot (U_m + \rho \cdot I_m) + \\ + \frac{1}{2} \cdot e^{-p\tau} \cdot (U_m - \rho \cdot I_m) \end{array} \right] l(t);$$

$$i(t) = \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \cdot e^{p\tau} \cdot (I_m + U_m / \rho) + \\ + \frac{1}{2} \cdot e^{-p\tau} \cdot (I_m - U_m / \rho) \end{array} \right] l(t), \quad (15)$$

где  $l(t)$  – базовый сигнал с единичной амплитудой как функция времени, задающая форму напряжений и токов нагрузок, величины  $u$  и  $i$  трактуются при этом как функции времени, а множители  $e^{p\tau}$  и  $e^{-p\tau}$  трактуются как операторы смещения базового сигнала во времени

$$e^{\pm p\tau} l(t) = l(t \pm \tau). \quad (16)$$

С учетом связей (12)-(14) уравнения (15) приводятся к следующим:

$$u(t) = U_m (e^{p\tau} + \Delta i^* \operatorname{sh} p\tau) l(t);$$

$$i(t) = I_H (e^{p\tau} + \Delta i^* \operatorname{ch} p\tau) l(t). \quad (17)$$

При изменении  $\tau$  величины  $u(t)$  и  $i(t)$  являются функциями не только времени, но и текущей координаты  $\tau$ . Как видно из (17), по-

строение зависимостей  $u(t)$  и  $i(t)$  во времени сводится к смещению базового сигнала  $1(t)$  на  $\pm\tau$  вдоль оси времени (рис. 4, а-г) с последующим умножением результатов сдвига на амплитудные значения и суммированием.

Рассматриваемый подход к получению установленных режимов в ПЛ может быть назван методом геометрического подобия и состоит, как видно, в задании формы сигналов в линии с помощью базисного сигнала с единичной амплитудой и последующим линейным преобразованием двух базисных сигналов, смещенных относительно исходного в обе стороны на время распространения  $\tau$ . Двустороннее смещение базисного сигнала является следствием существования прямой и отраженной волны в линии.

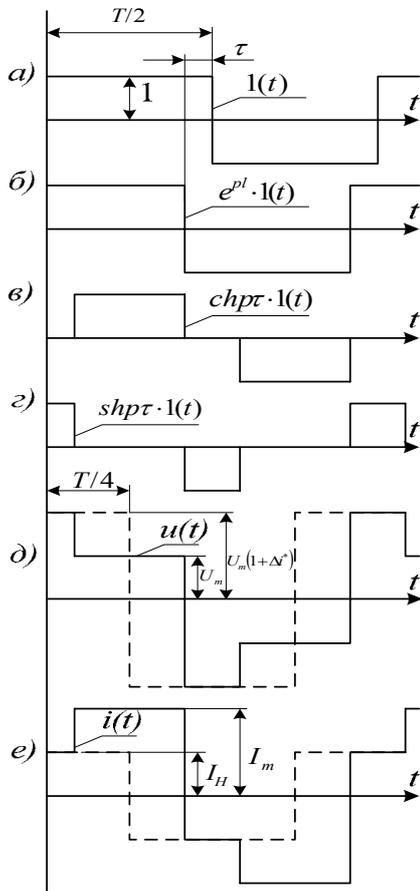


Рис. 4. Построение напряжения и тока в промежуточных точках ПЛ при базовом сигнале в виде идеального меандра

На рис.4, д-е построены напряжение и ток в промежуточной точке согласно (17) при базисном сигнале в виде идеального меандра (рис. 4, а). В интервалах смещения  $\pm\tau$  напряжение повышается в  $1 + \Delta\tau^*$  раз, в то время как ток снижается в той же пропорции. Пунктиром показаны напряжение и ток в средней точке от-

резка ( $\tau = T/4$ ). В частности, при номинальном токе  $I_m = I_N$  имеем:

$$\rho^* = 1 + \Delta i_N^*. \quad (18)$$

Для анализа влияния  $\rho^*$  определим квадрат действующего тока в точке ПЛ с относительной координатой  $\tau^* = 2 \cdot \tau / (T/2)$ :

$$I_\tau^2 = I_H^2 \tau^* + I_m^2 (1 - \tau^*) = \left( \frac{I_N}{\rho^*} \right)^2 \left[ \tau^* + (1 + \Delta i^*)^2 \cdot (1 - \tau^*) \right]. \quad (19)$$

На рис. 5 показано, как изменяется действующий ток вдоль отрезка между текущими ПП в номинальном режиме  $1 + \Delta\tau^* = 1 + \Delta\tau_N^* = \rho^*$ . Как видно, при  $\rho^* = 1$  (режим натуральной передаваемой мощности без отраженной волны) ток меняется только по фазе, и его действующее значение не зависит от текущей координаты точки. При мощности, превышающей натуральную  $\rho^* > 1$ , действующий ток в промежуточных точках снижается, а при обратной пропорции повышается.

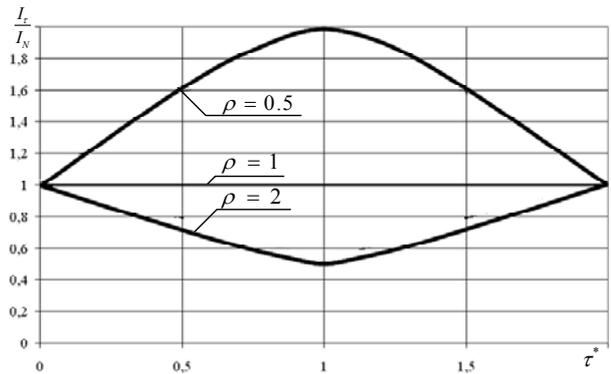


Рис. 5. Распределение действующего тока по длине отрезка между соседними пунктами питания КС

Для характеристики отрезка ПЛ в целом целесообразно усреднить квадрат тока по длине отрезка, получая действующий ток отрезка в целом:

$$I^2 = \int_0^1 I_\tau^2 d\tau^* = \frac{1}{2} \left( \frac{I_N}{\rho^*} \right)^2 \cdot \left[ 1 + (1 + \Delta i^*)^2 \right]. \quad (20)$$

По этому току можно рассчитывать потери мощности в проводнике кабеля без учета скин-эффекта:

$$\Delta P = R_n \cdot I^2, \quad (21)$$

где  $R_n$  – активное сопротивление кабеля на длине отрезка  $l_{\text{П}}$ .

В частности, в номинальном режиме и в режиме холостого хода ( $\Delta i^* = \Delta \tau_N^*$  и  $\Delta \tau^* = -1$ )

$$P_N = \frac{R_n \cdot I_N^2}{2} \cdot (1/\rho^{*2} + 1); \quad P_X = \frac{R_n \cdot I_N^2}{2 \cdot \rho^{*2}}; \quad P_X^* = \frac{P_X}{P_N} = \frac{1}{\rho^{*2} + 1}. \quad (22)$$

Как видно из (22), увеличение  $\rho^*$  против режима согласованной нагрузки ( $\rho^* = 1$ ) ведет к снижению потерь в кабеле, как в номинальном режиме, так и в режиме холостого хода. Это происходит за счет повышения амплитуды напряжения во всех точках отрезка, кроме двух крайних, в пропорции  $\rho^*$  (рис. 4, д). Разгрузка кабеля по току происходит за счет увеличения его загрузки по напряжению в промежуточных точках.

Потери холостого хода обусловлены протеканием в кабеле его собственных реактивных токов, первопричиной которых является емкость кабеля. Емкость кабеля потребляет реактивный ток даже при полном отсутствии активной нагрузки на ПЛ. Хотя напряжение в середине отрезка при этом отсутствует, но на краях отрезка оно сохраняет форму рис. 4, а и номинальную амплитуду  $U_m$ . Для железной дороги этот фактор играет определенную роль, поскольку возможны режимы, когда на участке  $l$  между двумя тяговыми подстанциями (рис. 1) нет ни одного движущегося состава.

На рис. 6 приведена зависимость напряжения на кабеле в долях от напряжения  $U_m$  в точках съема мощности и потерь холостого хода от волнового сопротивления кабеля. Область значений  $\rho^* < 1$  использовать нецелесообразно, т.к. амплитуда напряжения на кабеле при этом не снижается, а потери растут. Значение  $\rho^* = 1$  (режим согласованной нагрузки), который часто используется в системах передачи электроэнергии [5], дает потери холостого хода 50 % от номинальных. Поэтому целесообразна область значений  $\rho^*$  в пределах 1,5...2, которая дает потери холостого хода в пределах 0,3...0,2.

#### 4. Методика определения основных параметров и результаты моделирования

Принимая, что по кабелю передается от каждой из двух соседних подстанций половина

мощности, потребляемой в межподстанционной зоне, найдем последовательно

$$P_N = \frac{P'_B}{2} = K_d^2 \cdot U_m \cdot I_N; \quad R_N = \rho / \rho^*; \quad I_N = \frac{U_m}{R_N}; \quad U_m = \frac{1}{K_d} \cdot \sqrt{P_N \cdot R_N}, \quad (23)$$

где  $K_d$  – соотношение между действующим и амплитудным значениями для принятого базового сигнала. В частности, для МОС с синусоидальной аппроксимацией фронтов и плоской вершиной

$$K_d = \sqrt{1 - t_{\phi}^* / 2}, \quad (24)$$

где  $t_{\phi}^*$  – относительная длительность фронтов.

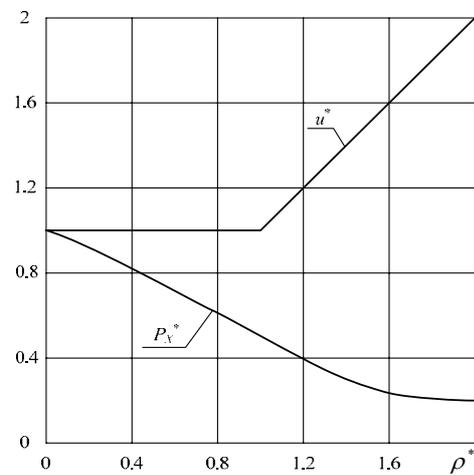


Рис. 6. Относительные значения амплитуды напряжения на кабеле и потерь холостого хода в функции относительно волнового сопротивления кабеля

Например, при  $P'_B = 20,6 \cdot 10^6$  Вт,  $t_{\phi}^* = 1/3$ ,  $\rho = 55$  Ом и  $\rho^* = 1,5$  имеем  $K_d = 0,91$ ,  $R_N = 36,7$  Ом,  $U_m = 21,4$  кВ,  $I_N = 580$  А.

При этих исходных данных, а также с учетом  $l_{\text{П}} = 10$  км,  $l = 60$  км была разработана Matlab-модель системы рис. 1, эксперименты на которой подтвердили приведенные выше количественные соотношения и рекомендации. На модели было выполнено также исследование влияния ряда реальных факторов, которые не учитывались приведенными выше асимптотическими зависимостями. В частности, анализировалось влияние отклонения от режима полуволновой настройки согласно равенству (5). При этом возникает нескомпенсированная реактивная составляющая внутреннего сопротивления кабельной ПЛ относительно выводов на

грузок. Это, с одной стороны, приводит к появлению реактивного падения напряжения на частоте основной гармоники  $a$ , с другой, в связи с зависимостью некомпенсированного сопротивления от частоты, к возникновению диспропорции между гармоническими составляющими напряжений и токов. Следствием является искажение формы сигналов, выражающееся в появлении пульсаций на плоской вершине МОС, увеличивающих амплитудные значения при заданных действующих.

Диспропорция быстро возрастает по мере приближения одной из резонансных частот (6) к верхней рабочей частоте МОС. Поскольку исходное расстояние между рабочей и резонансной частотами равно  $f/2$ , то условие резонанса имеет следующий вид

$$\Delta l_n^* \cdot k = 1/2, \quad (25)$$

где  $\Delta l_n^*$  – относительное отклонение по длине отрезка ПЛ от условия полуволновой настройки (5);  $k$  – номер верхней рабочей гармоники, используемой в МОС.

Например, при использовании трехгармонического меандра, содержащего только первую, третью и пятую гармоники, имеем  $k = 5$ , и тогда из (25) получаем  $\Delta l_{II}^* = 0,1$ . На рис. 7, *a* показано напряжение нагрузки при точной полуволновой настройке ( $\Delta l_{II}^* = 0$ ), а на рис. 7, *б* – при  $\Delta l_{II}^* = 0,1$ . Как видно, во втором случае имеют место сильные искажения формы напряжения из-за резонанса. Чтобы их избежать, вполне достаточен двукратный запас по  $\Delta l_{II}^*$  против условия резонанса (25). На рис. 7, *в* показано выходное напряжение при  $\Delta l_{II}^* = 0,05$ : пульсации на вершине остаются при этом достаточно малыми. Причина в том, что МОС, оптимизированный по величинам амплитуд гармоник, малочувствителен к отклонению амплитуд от оптимальных в довольно значительных пределах [4].

Причиной возможных отклонений от режима полуволновой настройки является не только отклонение по месту установки очередного ПП (допустимое отклонение, как видно из рис. 7, равно  $\pm 0,5$  км), но и по диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  изоляции кабеля ( $\pm 10\%$ ). Существенно, что речь идет только о разбросе по усредненным значениям этого параметра на отдельных отрезках ПЛ между соседними ПП. Однонаправленное изменение  $\epsilon$ , связанное, например, с изменением температуры окружаю-

щей среды, можно скомпенсировать изменением частоты напряжения в ПЛ. При использовании материала типа «сшитый полиэтилен» диэлектрическая проницаемость достаточно стабильна, и такая автоподстройка вряд ли потребуется.

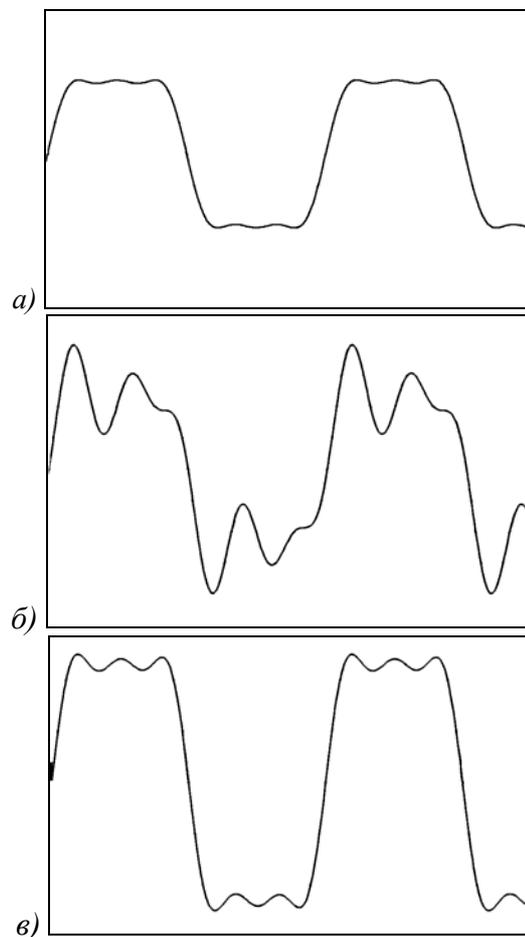


Рис. 7. Влияние неточности полуволновой настройки отрезка ПЛ: *a* – выходное напряжение при точной настройке; *б* – то же при отклонении 10%; *в* – то же при отклонении 5%

Следует отметить также, что диапазон допустимых отклонений от режима полуволновой настройки может быть расширен при использовании управляемых ПП. При этом появляется также и возможность стабилизации напряжения, но преобразователи удорожаются.

## Выводы

1. Применение системы распределенного питания контактной сети от кабельной продольной линии с повышенной частотой переменного напряжения позволяет примерно на порядок уменьшить массу силовых электромагнитных элементов в выпрямительных агрегатах, сократить в несколько раз число связей с питающей энергосистемой и расширить воз-

возможности управления системой электроснабжения.

2. Режим полуволновой настройки системы устраняет индуктивное падение напряжения в продольной линии, что позволяет использовать неуправляемые выпрямители, и снижает чувствительность к резонансным явлениям, что позволяет использовать в продольной линии квазипрямоугольную форму напряжений и токов, обеспечивающую более высокие энергетические показатели в сравнении с синусоидальной.

3. Изменением соотношения между волновым сопротивлением кабеля и сопротивлением номинальной нагрузки можно до 2...3 раз снизить потери холостого хода в продольной линии.

4. Свойство малого индуктивного падения напряжения в продольной линии, позволяющее применить неуправляемые выпрямители, сохраняется при отклонении по интервалу их установки в пределах  $\pm 0,5$  км и при отклонении по величине диэлектрической проницаемости изоляции кабеля в пределах  $\pm 10$  %.

5. Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность предлагаемой системы и основные количественные соотношения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст] : учеб. для вузов ж/д трансп. / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
2. Бадер, М. П. Концепция обновления и перспективы развития систем тягового электроснабжения [Текст] / М. П. Бадер, В. Г. Сыченко // Техн. електродинаміка. – Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – К., 2009. – Ч. 2. – С. 88-93.
3. Преобразователь формы напряжения для системы электроснабжения контактной сети переменного тока [Текст] / Ю. П. Гончаров [и др.] // Материалы III Межд. науч.-практ. конф. «Электрификация железнодорожного транспорта» ТРАНСЭЛЕКТРО-2009» (Мисхор). – 2009. – С. 35.
4. Передача электрической энергии однофазным переменным током в форме меандра с ограниченным спектром [Текст] / Ю. П. Гончаров [и др.] // Техн. електродинаміка. – Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – К., 2008. – Ч. 1. – С. 3-11.
5. Александров, Г. Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи [Текст] : учеб. пособие / Г. Н. Александров. – СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2006. – 139 с.

Поступила в редколлегию 12.05.2011.

Принята к печати 17.05.2011.