

# АНАЛИЗ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА $Y/\Delta$ С ЗИГЗАГОМ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

В.М. Збродыго, инженер, Г. И. Янукович, канд. техн. наук, профессор, А.П. Сердешнов, канд. техн. наук, профессор (УО БГАТУ)

### Аннотация

*Выполнен теоретический анализ работы трансформатора  $Y/\Delta$  с зигзагом при несимметричном характере нагрузки. Получены схемы замещения трансформатора для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Доказана способность трансформатора обеспечивать симметрию напряжений на первичной и вторичной сторонах.*

### Введение

Задача повышения качества напряжения в сельских электрических сетях актуальна для всех регионов Республики Беларусь. Это объясняется территориальной разобщенностью потребителей, большой протяженностью воздушных линий при малой передаваемой мощности. В таких сетях поддержание нормированного уровня качества напряжения связано со значительными трудностями.

Рекомендованные для применения в сетях сельскохозяйственного назначения трансформаторы  $Y/Y_n$ ,  $\Delta/Y_n$ ,  $Y/\Delta$ ,  $Y_n/\Delta$ ,  $Y/Z_n$  не позволяют обеспечивать достаточно высокий уровень симметрии напряжений при несимметричном характере нагрузки [1,2].

### Основная часть

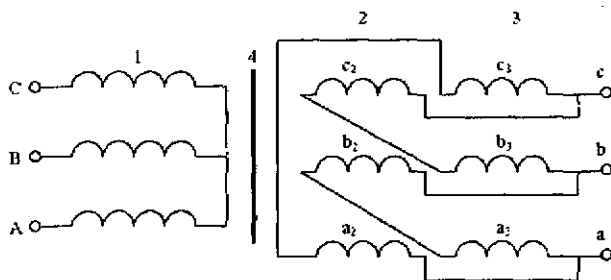
Для решения задачи обеспечения качества напряжения в электросетях сельскохозяйственного назначения авторы предлагают осуществлять питание несимметричных потребителей при помощи трансформатора со схемой соединения  $Y/\Delta$  с зигзагом, схема соединения обмоток которого представлена на рис. 1 [3]. Первичные обмотки 1 трансформатора соединены в

звезду. Вторичные обмотки 2-3 состоят из двух соединенных последовательно половин 2 и 3, находящихся на разных стержнях магнитопровода 4. Причем на каждом из стержней магнитопровода находятся половинки обмоток двух разных фаз. В частности, обмотка фазы «а» состоит из двух половин  $a_2$  и  $a_3$ , фазы «b» – из половин  $b_2$  и  $b_3$ , фазы «с» – из половин  $c_2$  и  $c_3$ .

Произведем анализ работы трансформатора при несимметричной нагрузке методом симметричных составляющих, сущность которого состоит в том, что любую несимметричную систему трех токов, напряжений и т. д. одинаковой частоты можно представить в виде трех симметричных систем: прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом сопротивления одних и тех же элементов электрических систем различны для разных последовательностей и называются соответственно сопротивлением прямой, обратной и нулевой последовательностей. Так же примем следующие допущения:

1. Трансформатор является линейным элементом сети.
2. Система первичных напряжений симметрична и не зависит от режима работы трансформатора.
3. Ток холостого хода равен нулю.
4. Обмотки трансформатора, размещенные на одном стержне, рассматриваются как обмотки трехобмоточного трансформатора. При этом параметры каждой из половин вторичной обмотки приведены к параметрам первичной обмотки.
5. Исследуемый трансформатор понижающий.

Анализ работы трансформатора при несимметричной нагрузке начнем с рассмотрения условий протекания токов нулевой последовательности. Для этого рассмотрим схему соединения обмоток  $Y/\Delta$  с зигзагом, представленную на рис. 1. Обмотка высшего



*Рис. 1. Трансформатор со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  с зигзагом: 1 – первичная обмотка трансформатора; 2–3 – вторичные обмотки; 4 – магнитопровод*

напряжения соединена в звезду без нулевого провода. Поэтому в ней нет пути для протекания токов нулевой последовательности. В этой обмотке они отсутствуют. Система фазных токов обмотки высшего напряжения является уравновешенной, а их сумма равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0, \quad (1)$$

где  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  — фазные токи обмотки высшего напряжения фаз А, В, С, соответственно.

Фазные токи обмотки высшего напряжения равны:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = \dot{I}'_A; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = \dot{I}'_B; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = \dot{I}'_C, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{C1}$  — токи прямой последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора фазы А, В, С, соответственно;

$\dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2}$  — токи обратной последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора фазы А, В, С, соответственно;

$\dot{I}'_A, \dot{I}'_B, \dot{I}'_C$  — сумма токов прямой и обратной последовательностей обмотки высшего напряжения трансформатора фазы А, В, С, соответственно.

Фазные напряжения высшей обмотки трансформатора могут содержать составляющие всех последовательностей:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \dot{U}'_A + \dot{U}_{A0}; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0} = \dot{U}'_B + \dot{U}_{B0}; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0} = \dot{U}'_C + \dot{U}_{C0}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  — фазные напряжения высшей обмотки трансформатора фазы А, В, С, соответственно;

$\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$  — напряжения прямой последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора фазы А, В, С, соответственно;

$\dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$  — напряжения обратной последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора фазы А, В, С, соответственно;

$\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{B0}, \dot{U}_{C0}$  — напряжения нулевой последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора фазы А, В, С, соответственно;

$\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$  — сумма напряжений прямой и обратной последовательностей обмотки высшего напряжения трансформатора фазы А, В, С, соответственно.

По обмотке низшего напряжения трансформатора, соединенной в треугольник, могут протекать токи нулевой последовательности. Обмотка, соединенная треугольником, представляет для токов нулевой последовательности короткозамкнутую цепь, по которой

они будут циркулировать, не выходя в линии. Следовательно, фазные токи вторичной обмотки трансформатора могут содержать составляющие всех последовательностей:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}'_{a1} + \dot{I}'_{a2} + \dot{I}_{a0} = \dot{I}''_a + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}'_{b1} + \dot{I}'_{b2} + \dot{I}_{b0} = \dot{I}''_b + \dot{I}_{b0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}'_{c1} + \dot{I}'_{c2} + \dot{I}_{c0} = \dot{I}''_c + \dot{I}_{c0}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\dot{I}'_{a1}, \dot{I}'_{b1}, \dot{I}'_{c1}$  — токи прямой последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно;

$\dot{I}'_{a2}, \dot{I}'_{b2}, \dot{I}'_{c2}$  — токи обратной последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно;

$\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$  — токи нулевой последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно;

$\dot{I}''_a, \dot{I}''_b, \dot{I}''_c$  — сумма токов прямой и обратной последовательностей обмотки низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно.

Фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора, соединенной треугольником, не содержат составляющих нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}'_{a1} + \dot{U}'_{a2} = \dot{U}''_a; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}'_{b1} + \dot{U}'_{b2} = \dot{U}''_b; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}'_{c1} + \dot{U}'_{c2} = \dot{U}''_c, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  — фазные напряжения низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно;

$\dot{U}'_{a1}, \dot{U}'_{b1}, \dot{U}'_{c1}$  — напряжения прямой последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно;

$\dot{U}'_{a2}, \dot{U}'_{b2}, \dot{U}'_{c2}$  — напряжения обратной последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно;

$\dot{U}''_a, \dot{U}''_b, \dot{U}''_c$  — сумма напряжений прямой и обратной последовательностей обмотки низшего напряжения трансформатора фазы а, b, c, соответственно.

Трансформатор является статическим аппаратом. Сопротивления прямой и обратной последовательностей у него равны друг другу и равны сопротивлению короткого замыкания. Следовательно, нет необходимости рассматривать отдельно токи прямой и обратной последовательностей. Можно рассматривать только их сумму.

Для обмотки высшего напряжения фазы А справедливо выражение:

$$\dot{U}_A = -\dot{E}_A + \dot{I}_A z_1, \quad (6)$$

где  $\dot{E}_A$  — ЭДС первичной обмотки фазы А,

создаваемая основным магнитным потоком трансформатора;

$z_1$  — эквивалентное сопротивление обмотки высшего напряжения трансформатора.

Для полуобмоток низкого напряжения  $a_2$  и  $a_3$  (рис.1), находящихся на том же стержне магнитопровода, что и обмотка высшего напряжения фазы А, и принадлежащих разным фазам:

$$\dot{U}_{a2} = \dot{E}_A - \dot{I}_{a2} z_2; \quad (7)$$

$$\dot{U}_{a3} = \dot{E}_A - \dot{I}_{a3} z_3,$$

где  $\dot{U}_{a2}$ ,  $\dot{U}_{a3}$  — напряжения полуобмоток  $a_2$  и  $a_3$  вторичной стороны;

$z_2$ ,  $z_3$  — эквивалентное сопротивление полуобмоток 2 и 3, соответственно;

$\dot{I}_{a2}$ ,  $\dot{I}_{a3}$  — токи, протекающие по полуобмоткам 2 и 3, соответственно.

Эквивалентные сопротивления обмоток высшего напряжения и полуобмоток низшего напряжения можно определить из выражений:

$$\begin{aligned} z_1 &= r_1 + jx_1 = r_1 + j\omega(L_1 - M_{12} - M_{13} + M_{23}); \\ z_2 &= r_2 + jx_2 = r_2 + j\omega(L_2 - M_{12} - M_{23} + M_{13}); \\ z_3 &= r_3 + jx_3 = r_3 + j\omega(L_3 - M_{13} - M_{23} + M_{12}), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  — активные сопротивления обмотки высшего напряжения, полуобмоток 2 и 3 низшего напряжения, соответственно;

$x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  — реактивные сопротивления обмоток;

$L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  — индуктивность обмотки высшего напряжения и полуобмоток 2 и 3 низшего напряжения, соответственно;

$M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$  — взаимная индуктивность пары обмоток.

Разложим обе части уравнений (6) и (7) на симметричные составляющие:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \\ &= -\dot{E}_{A1} - \dot{E}_{A2} - \dot{E}_{A0} + \dot{I}_{A1} z_1 + \dot{I}_{A2} z_1; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a2} &= \dot{U}_{a21} + \dot{U}_{a22} = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{A2} + \dot{E}_{A0} - \\ &- \dot{I}_{a21} z_2 - \dot{I}_{a22} z_2 - \dot{I}_{a20} z_2; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a3} &= \dot{U}_{a31} + \dot{U}_{a32} = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{A2} + \\ &+ \dot{E}_{A0} - \dot{I}_{a31} z_3 - \dot{I}_{a32} z_3 - \dot{I}_{a30} z_3, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\dot{U}_{a21}$ ,  $\dot{U}_{a31}$  — напряжения прямой последовательности полуобмоток  $a_2$  и  $a_3$ , соответственно;

$\dot{U}_{a22}$ ,  $\dot{U}_{a32}$  — напряжения обратной последовательности полуобмоток  $a_2$  и  $a_3$ , соответственно;

$\dot{E}_{A1}$ ,  $\dot{E}_{A2}$ ,  $\dot{E}_{A0}$  — ЭДС прямой, обрат-

ной и нулевой последовательностей фазы А;

$\dot{I}_{a21}$ ,  $\dot{I}_{a31}$  — токи прямой последовательности полуобмоток  $a_2$  и  $a_3$ , соответственно;

$\dot{I}_{a22}$ ,  $\dot{I}_{a32}$  — токи обратной последовательности полуобмоток  $a_2$  и  $a_3$ , соответственно;

$\dot{I}_{a20}$ ,  $\dot{I}_{a30}$  — токи нулевой последовательности полуобмоток  $a_2$  и  $a_3$ , соответственно.

Из выражения (9) следует:

$$\dot{U}'_A = -\dot{E}'_A + \dot{I}'_A z_1; \quad (12)$$

$$\dot{U}'_{A0} = -\dot{E}_{A0}, \quad (13)$$

где  $\dot{E}'_A$  — сумма ЭДС прямой и обратной последовательностей обмотки высшего напряжения фазы А.

Из выражения (10) получим:

$$\dot{U}''_{a2} = \dot{E}'_A - \dot{I}''_{a2} z_2; \quad (14)$$

$$\dot{U}_{a20} = 0 = \dot{E}_{A0} - \dot{I}_{a20} z_2, \quad (15)$$

где  $\dot{U}''_{a2}$  — сумма напряжений прямой и обратной последовательностей полуобмотки  $a_2$ ;

$\dot{I}''_{a2}$  — сумма токов прямой и обратной последовательностей полуобмотки  $a_2$ ;

$\dot{U}_{a20}$  — напряжение нулевой последовательности полуобмотки  $a_2$ .

Из выражения (11) получим:

$$\dot{U}''_{a3} = \dot{E}'_A - \dot{I}''_{a3} z_3; \quad (16)$$

$$\dot{U}_{a30} = 0 = \dot{E}_{A0} - \dot{I}_{a30} z_3, \quad (17)$$

где  $\dot{U}''_{a3}$  — сумма напряжений прямой и обратной последовательностей полуобмотки  $a_3$ ;

$\dot{I}''_{a3}$  — сумма токов прямой и обратной последовательностей полуобмотки  $a_3$ ;

$\dot{U}_{a30}$  — напряжение нулевой последовательности полуобмотки  $a_3$ .

На основании выражений (12), (14), (16) составлена схема замещения трансформатора для токов прямой и обратной последовательностей, представленная на рис. 2,а. На основании выражений (13), (15), (17) составлена схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности, которая представлена на рис. 2,б. Стрелками на схеме показаны положительные направления токов, напряжений и ЭДС.

На основании схемы замещения трансформатора для токов прямой и обратной последовательностей (рис. 2,а) будет справедлива следующая взаимосвязь между первичными и вторичными напряжениями прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{U}'_A - \dot{I}'_A z_1 + \dot{I}''_{a2} z_2 = \dot{U}''_{a2}; \quad (18)$$

$$\dot{U}'_A - \dot{I}'_A z_1 + \dot{I}''_{a3} z_3 = \dot{U}''_{a3}. \quad (19)$$

Для составляющих нулевой последовательности (рис. 2,б) получим:

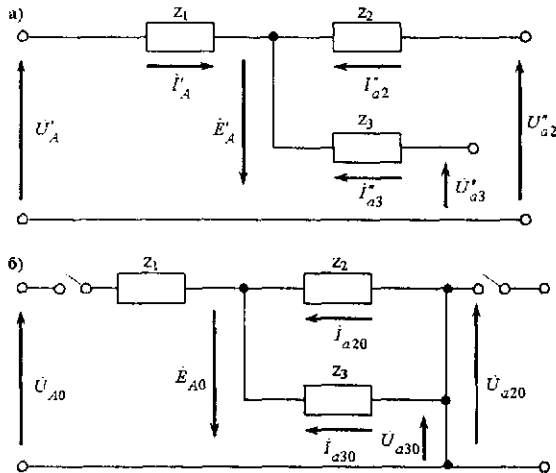


Рис. 2. Схемы замещения трансформатора  $Y/\Delta$  с зигзагом: а) – схема замещения для токов прямой и обратной последовательностей; б) – схема замещения для токов нулевой последовательности

$$\dot{U}_{A0} + \dot{I}_{a20} z_2 = \dot{U}_{a20}; \quad (20)$$

$$\dot{U}_{A0} + \dot{I}_{a30} z_3 = \dot{U}_{a30}. \quad (21)$$

Обмотки трансформатора выполнены таким образом, что токи нулевой последовательности обтекают полуфазы вторичных обмоток, расположенных на каждом из стержней магнитопровода, в противоположных направлениях. Сумма магнитодвижущих сил, создаваемых этими токами, при условии симметричного выполнения полуфаз, равна нулю. Т.е. магнитные потоки нулевой последовательности в каждом из стержней магнитопровода будут равны нулю:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{a0} &= \dot{\Phi}_{a20} + \dot{\Phi}_{a30} \cdot e^{j180^\circ} = 0; \\ \dot{\Phi}_{b0} &= \dot{\Phi}_{b20} + \dot{\Phi}_{b30} \cdot e^{j180^\circ} = 0; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\dot{\Phi}_{c0} = \dot{\Phi}_{c20} + \dot{\Phi}_{c30} \cdot e^{j180^\circ} = 0,$$

где  $\dot{\Phi}_{a0}, \dot{\Phi}_{b0}, \dot{\Phi}_{c0}$  – магнитные потоки нулевой последовательности в стержнях магнитопровода трансформатора фазы а, b, с, соответственно;

$\dot{\Phi}_{a20}, \dot{\Phi}_{b20}, \dot{\Phi}_{c20}$  – магнитные потоки нулевой последовательности в стержнях магнитопровода, создаваемые токами нулевой последовательности полубмоток  $a_2, b_2, c_2$ , соответственно;

$\dot{\Phi}_{a30}, \dot{\Phi}_{b30}, \dot{\Phi}_{c30}$  – магнитные потоки нулевой последовательности в стержнях магнитопровода, создаваемые токами нулевой последовательности полубмоток  $a_3, b_3, c_3$ , соответственно.

Следовательно, ЭДС, создаваемые потоками нулевой последовательности в обмотках трансформатора, также будут равны нулю:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{A0} &= 0; \\ \dot{E}_{B0} &= 0; \\ \dot{E}_{C0} &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Тогда с учетом выражения (13), получим

$$\dot{U}_{A0} = 0. \quad (24)$$

С учетом выражения (15):

$$-\dot{I}_{a20} z_2 = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{a20} = 0. \quad (25)$$

С учетом выражения (17):

$$-\dot{I}_{a30} z_3 = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{a30} = 0. \quad (26)$$

Из выражения (24) следует, что в систему фазных напряжений первичной стороны трансформатор не генерирует составляющих нулевой последовательности, и эта система является уравновешенной.

Из выражения (25) и (26) следует, что фазные токи вторичной обмотки трансформатора не содержат составляющих нулевой последовательности. Следовательно, система фазных токов является уравновешенной, т.е.:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (27)$$

#### Заключение

В результате теоретического анализа получены схемы замещения трансформатора  $Y/\Delta$  с зигзагом для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Доказана способность трансформатора при несимметричном характере нагрузки обеспечивать симметрию напряжений на первичной и на вторичной сторонах вследствие компенсации потоков нулевой последовательности в стержнях магнитопровода. При этом магнитная система трансформатора будет уравновешенной. Дальнейший анализ позволяет получить выражения для определения токов и напряжений первичной и вторичной сторон трансформатора, доказывающих, что искажение системы напряжений обусловлено только неодинаковой величиной падения напряжения в отдельных фазах на сопротивлениях обратной последовательности. Однако такое искажение незначительно и трансформатор может вполне успешно работать на несимметричную нагрузку, поддерживая высокий уровень качества напряжения.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Будзко И.А. Электроснабжение сельского хозяйства: Учебное пособие для вузов / И.А. Будзко, Н.М. Зуль / Под редакцией И.А. Будзко. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.

2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия,

1970. – 432 с.

3. Трехфазный трансформатор: патент 2244 Респ. Беларусь, МКП7 Н01F 30/12 /А.П.Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А.Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявитель УО БГАТУ. –№950299; заявл. 09.06. 95; опубл. 30.09.98// Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. —1998– №3 (18).– С.216-217.

УДК 631.56:543.712.08

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.04.2006

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СВЧ-ВЛАГОМЕРОВ НА ОСНОВЕ ВИДЕОДЕТЕКТИРОВАНИЯ**

**В.В. Лисовский, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ)**

### **Аннотация**

*Рассмотрены вопросы повышения точности измерения влажности сверхвысокочастотными влагомерами.*

*Приведены результаты исследования одного из наиболее распространенных типов промежуточных преобразователей на основе видеодетектирования.*

*Результаты исследований нашли практическое применение при разработке некоторых моделей сверхвысокочастотных влагомеров серии «Микрорадар».*

### **Введение**

Одной из основных задач современного сельскохозяйственного производства является создание высококачественной продукции при минимизации ее себестоимости на основе применения новейших энерго- и ресурсосберегающих технологий. В связи с этим резко возрастают требования к соблюдению технологической дисциплины и повышению достоверности контроля параметров перерабатываемого материала, одним из которых является влажность.

В настоящее время в республике разработан и серийно выпускается ряд сверхвысокочастотных (СВЧ) влагомеров для непрерывного и дискретного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Они имеют существенные преимущества перед традиционными емкостными влагомерами и, в первую очередь, значительно более высокие метрологические характеристики [1]. Дальнейшее повышение их точности неразрывно связано с оптимизацией параметров первичных и промежуточных измерительных преобразователей сверхвысокочастотных устройств контроля влажности. Оптимизации параметров первичных измерительных СВЧ-преобразователей влажности посвящено достаточно много работ как в нашей стране, так и за рубежом.

[2], в то же время практически отсутствуют аналогичные исследования по промежуточным измерительным преобразователям.

Цель данной работы – выявление наиболее существенных элементов промежуточных преобразователей на основе видеодетектирования, вносящих основной вклад в их результирующую погрешность.

### **Основная часть**

В измерительных преобразователях данного типа в качестве чувствительного элемента, в котором осуществляется преобразование СВЧ-сигнала в сигнал постоянного тока, используется детекторный СВЧ-диод.

Структурная схема простейшего промежуточного измерительного преобразователя (ПРИП) с детекторным СВЧ-диодом представлена на рис. 1.

Схему ПРИП такого типа будем называть прямопоказывающей. В качестве детекторных диодов в СВЧ-влагомерах наиболее часто используются точечные диоды (Д 604, Д 605), а также диоды с барьером Шотки (КА 203А). Теория выпрямления, разработанная Шотки, применима как к точечным диодам, так и к диодам с барьером Шотки.