

## Авторы:

Солдатов А.В.<sup>2</sup>,  
к.т.н. Антонов В.И.<sup>1,2</sup>,  
к.т.н. Наумов В.А.<sup>2</sup>,  
Иванов Н.Г.<sup>1,2</sup>,  
Александрова М.И.<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup> Чувашский  
государственный университет  
им. И.Н. Ульянова,  
<sup>2</sup> ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия.

Soldatov A.V.<sup>2</sup>,  
Ph.D. Antonov V.I.<sup>1,2</sup>,  
Ph.D. Naumov V.A.<sup>2</sup>,  
Ivanov N.G.<sup>1,2</sup>,  
Alexandrova M.I.<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup> Chuvash State University,  
<sup>2</sup> EKRA Ltd.,  
Cheboksary, Russia.

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ БАЗИС ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ СТАТОРА НА ЗЕМЛЮ С КОНТРОЛЕМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТОКА<sup>3</sup> A CONCEPTUAL FRAMEWORK OF GENERATOR GROUND PROTECTION USING DIFFERENTIAL CURRENT HARMONICS

Аннотация: в статье рассматриваются концептуальные основы реализации защиты генератора от однофазных замыканий на землю, использующей высшие гармоники дифференциального тока как информационный базис. Описана природа возникновения высших гармоник в сети генераторного напряжения. Даны расчетные выражения токов высших гармоник на входе защиты в нормальном режиме и при однофазных замыканиях на землю в генераторе и прилегающей сети.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, высшие гармоники, генератор, релейная защита.

**Annotation:** a conceptual framework of generator ground protection using differential current harmonics as information base is described. The reason of harmonics arising in generator circuit is explained. Calculating expressions for harmonic currents in normal operation mode, internal and external ground faults are given.

**Keywords:** ground faults, harmonics, generator, relay protection.

Известно, что генератор является источником высших гармоник [1]. Это свойство генератора используется в защитах обмотки статора генератора блока «генератор-трансформатор» от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) [2], информационными слагаемыми в сигналах которых обычно являются основная и 3-я гармоники напряжения нулевой последовательности. К сожалению, этих составляющих недостаточно при выполнении защиты от ОЗЗ в генераторах укрупненного блока и в сетях с гальванической связью между генератором и потребителем из-за потери ими селективности.

Для защиты генераторов с гальванической связью с сетью потребителя в работе [3] было предложено использование дифференциальных токов высших гармоник генератора. Предложение не нашло широкого внедрения в эксплуатацию из-за ряда недостатков, основным из которых является наличие зоны нечувствительности, связанной с использованием в качестве характеристической величины действующего значения всей совокупности гармоник дифференциального тока [4].

Преодоление ограничений предложеного способа нами видится в расширении инфор-

мационной базы защиты за счет использования информации на каждой высшей гармонике. Именно под таким углом зрения в настоящей статье рассматриваются теоретические вопросы реализации защиты генератора от ОЗЗ статора с контролем высших гармоник дифференциального тока.

## Физические основы возникновения высших гармоник

Природа возникновения высших гармоник в генераторной сети двояка. В одних схемах, как блок «генератор-трансформатор» или укрупненный блок, преобладают высшие гармоники, возникающие, главным образом, из-за нелинейности магнитной системы генератора [2]. Иными словами, их источник находится в генераторной сети. В других схемах, например, в схемах работы генератора на сборные шины, в генераторную сеть будут еще инжектированы гармоники из примыкающей к шинам электрической сети (нагрузочной сети).

Оценим уровень гармоник, рассматривая генератор как источник напряжения высших гармоник и учитывая, что уровень высших

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 02.G25.31.0204) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства».



**Солдатов**

**Александр Вячеславович**

Окончил в 2006 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, по специальности «инженер». Заместитель заведующего отделом РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



**Антонов**

**Владислав Иванович**

Окончил в 1978 г. факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 1985 г. защитил в Ленинградском политехническом институте кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование новых принципов построения измерительных органов направленных защит линий электропередачи». Доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

гармоник в нагрузочной сети нормируется стандартами [5] и не может превышать допустимых пределов. Поэтому в расчетах можно учитывать их предельно допустимые значения. В то же время уровень высших гармоник генераторной сети не нормируется и зависит от типа генераторов.

Существует два типа генераторов: турбо- и гидрогенераторы. Для турбогенераторов характерна высокая частота вращения, поскольку их обмотка возбуждения равномерно уложена в пазы сердечника ротора, и на высокой скорости вращения такой ротор не испытывает больших динамических нагрузок. Воздушный зазор  $\delta$  между статором и ротором турбогенератора практически одинаков по всему периметру (рис. 1, а), и ротор не имеет явно выраженных полюсов, в связи с чем распределение магнитной индукции в воздушном зазоре вокруг ротора имеет трапецеидальный характер. По этой причине ЭДС генератора и во времени изменяется по трапецеидальному закону.

Гидрогенераторы имеют низкую частоту вращения. Их ротор представляет собой магнитную систему с явно выраженными магнитными полюсами. Края полюсов скошены с таким расчетом  $\delta_{\max} \approx 1,5\delta$ , чтобы распределение магнитной индукции в зазоре максимально приближалось к синусоиде (рис. 1, б). За счет этого уровень высших гармоник гидрогенераторов ниже, чем у турбогенераторов. В дальнейшем для упрощения расчетов примем, что и для гидрогенератора форму распределения магнитной индукции в зазоре можно аппроксимировать трапецеидальной кривой.

Из-за симметрии магнитной системы индукция генератора содержит только нечетные гармоники. Учитывая трапецеидальность формы, индукция в окрестности фазных обмоток статора генератора может быть представлена в виде слагаемых гармонического ряда с амплитудами

$$B_v = \frac{4B_{\max}}{\pi\alpha v^2} \sin(v\alpha), \quad (1)$$

где  $B_{\max}$  – максимальное значение индукции в зазоре;  $\alpha$  – половина угловой длины дуги, на которой располагается обмотка возбуждения;  $v = 1, 3, 5, \dots$  – номер гармоники.

Видно (рис. 2, а), что с увеличением  $\alpha$  удельное содержание высших гармоник генератора снижается, что непременно скажется на чувствительности защит от однофазных замыканий на землю.

Значение  $\alpha$  определяется конфигурацией ротора генератора [1]. Для генераторов нормальное значение  $\alpha$ , как правило, находится в пределах  $24,3^\circ \div 32,4^\circ$ . Насыщение магнитопровода статора генератора может привести к снижению расчетной величины  $\alpha$  до  $18^\circ$ .

Для генераторов с сосредоточенной диаметральной обмоткой статора уровни гармоник ЭДС пропорциональны уровням гармоник индукции (1)

$$E_{D,v} = \frac{4E_{\max}}{\pi\alpha v^2} \sin(v\alpha), \quad (2)$$

где  $E_{\max}$  – амплитуда ЭДС.

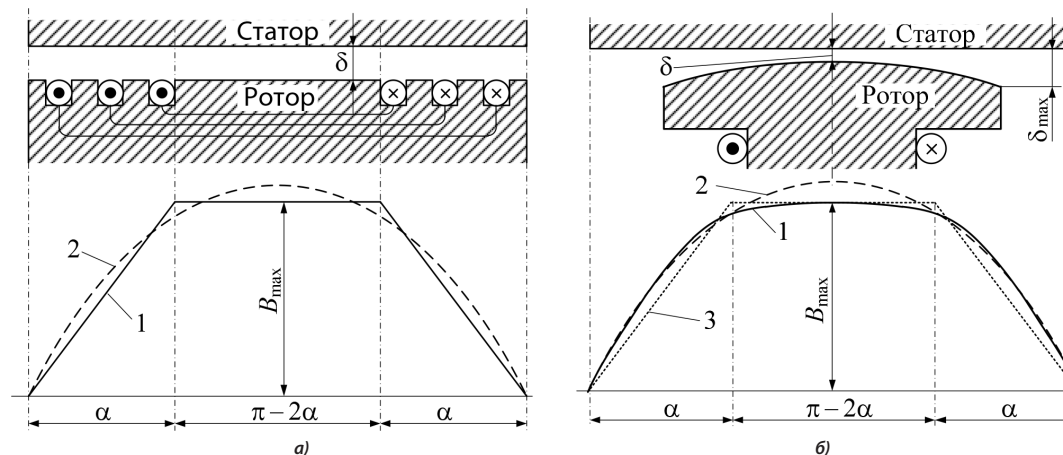


Рис. 1. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре а) турбогенератора и б) гидрогенератора: 1 – индукция  $B$ , 2 – первая гармоника индукции  $B_v$ , 3 – аппроксимация кривой индукции в случае гидрогенератора



**Наумов Владимир Александрович**  
Окончил в 2001 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, по специальности «инженер». В 2002 г. защитил магистерскую диссертацию. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Заместитель генерального директора – технический директор ООО НПП «ЭКРА».



**Иванов Николай Геннадьевич**  
Окончил в 2013 г. кафедру ТОЭ и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Инженер 2 категории отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА», аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Табл. 1. Уровень гармоник ЭДС турбогенератора Г7 Казанской ТЭЦ-2

$\nu$	1	3	5	7	9	11	13	15
$E_v^*$	1,0	0,116883	0,003181	0,000362	0,004116	0,001437	0,000057	0,000794

Для снижения уровня высших гармоник ЭДС обмотку укладывают в пазы статора с укороченным шагом и распределяют по пазам специальным образом [1]. Величина ЭДС такой обмотки может быть определена через ЭДС сосредоточенной обмотки с диаметральной шаг (2) как

$$E_v = E_{D,v} k_{sh,v} k_{sp,v} \quad (3)$$

где

$$k_{sh,v} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta \nu\right) -$$

коэффициент укорочения шага обмотки (рис. 2, б),

$$k_{sp,v} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6} \nu\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{6q} \nu\right)} -$$

коэффициент распределения обмотки (рис. 2, в),  $\beta$  – относительный шаг обмотки по отношению к полюсному делению, обычно  $0,79 \div 0,84$ ,  $q$  – число пазов на полюс и фазу, как правило, больше 4.

В качестве примера в табл. 1 приведен уровень гармоник ЭДС  $E_v^*$  турбогенератора Г7 Казанской ТЭЦ-2 ( $\alpha = 27, 45^\circ$ ,  $\beta = 0,833$  и  $q = 12$ ), отнесенный к амплитуде основной гармоники  $E_1$ .

ЭДС фаз генератора во времени меняется

следующим образом:

$$\begin{cases} e^{(A)}(t) \\ e^{(B)}(t) \\ e^{(C)}(t) \end{cases} = \sum_{\nu=1,3,5,\dots} E_\nu \begin{cases} \sin(\nu \omega_1 t) \\ \sin\left[\nu\left(\omega_1 t + \frac{4}{3}\pi\right)\right] \\ \sin\left[\nu\left(\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi\right)\right] \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\omega_1$  – частота основной гармоники. Амплитуда ЭДС (4) гармоники определяется согласно (3).

Видно, что группы гармоник, для которых выполняется условие деления нацело

$$(\nu - 1) / 3, \nu \in (1, 7, 13, \dots), \quad (5)$$

являются составляющими прямой последовательности,

$$(\nu + 1) / 3, \nu \in (5, 11, 17, \dots) - \quad (6)$$

составляющими обратной последовательности и

$$\nu / 3, \nu \in (3, 9, 15, \dots) - \quad (7)$$

составляющими нулевой последовательности.

Несинусоидальность формы кривой ЭДС генератора приводит к появлению высших гармоник и в токе. Уровни гармоник зависят

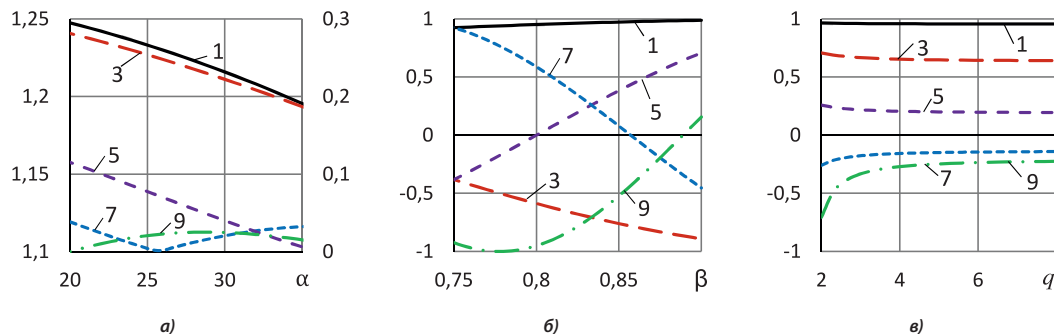


Рис. 2. Зависимости уровней гармоник от конструктивных особенностей генератора: а) относительной индукции  $B_v^*$  от  $\alpha$ ; б) коэффициента укорочения шага обмотки  $k_{sh,\nu}$  от  $\beta$ ; в) коэффициента распределения обмоток  $k_{sp,\nu}$  от  $q$ . Номер кривой соответствует номеру гармоники. На рис. а) для высших гармоник используется правая шкала. Амплитуда основной гармоники  $B_1$  отнесена к максимальному значению индукции  $B_{max}$ , амплитуды высших гармоник  $B_\nu$  к амплитуде основной гармоники  $B_1$



**Александрова  
Марина Ивановна**

В 2016 г. в ЧГУ им. И.Н.Ульянова получила степень бакалавра по направлению «Электроэнергетика и электротехника», специальность «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Продолжает обучение в магистратуре ЧГУ им. И.Н.Ульянова, специальность «Автоматика энергосистем». Инженер отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

от параметров электрической сети и, как правило, определяются ее емкостной проводимостью [6]. Для оценки информационной ценности высших гармоник определим их уровень в токах нормального и аварийного режимов генератора. Нас интересует схема сети, когда генераторы работают на сборные шины (рис. 3).

**Схема замещения электрической сети**

Все источники сети представляются в виде двух генераторов: защищаемого  $G$  и эквивалентного  $G_E$ , объединяющего в себе все остальные источники (рис. 4). Генераторы учитываются П-образной схемой замещения. ЭДС генераторов принимаются равными и являются источниками трехфазного полигармонического сигнала, состоящего из кратных нечетных гармоник (4) с комплексными действующими значениями  $\underline{E}_v^{(\sigma)}$  ( $\sigma = A, B, C$ ) [2]. Поперечные ветви генераторов в схеме замещения представляются соответствующими емкостями  $\frac{C_G}{2}$  и  $\frac{C_E}{2}$  и учитываются в расчет-

ных выражениях общими емкостными проводимостями фазы на каждой  $v$ -й гармонике.

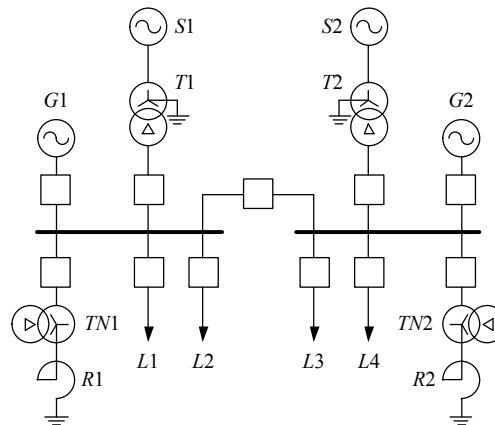


Рис. 3. Схема электрической сети

$$\underline{Y}_{G,v} = jv\omega_1 C_G$$

и

$$\underline{Y}_{E,v} = jv\omega_1 C_E$$

Сопротивления продольных ветвей генераторов незначительны по сравнению с со-

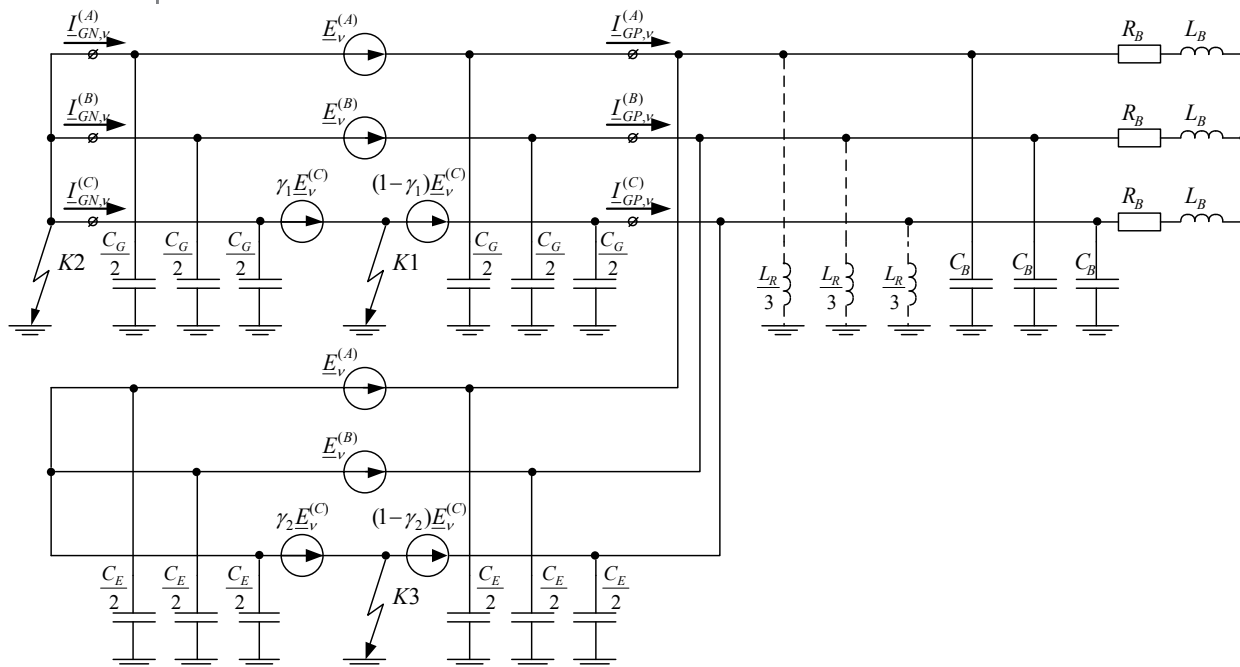


Рис. 4. Эквивалентная схема электрической сети и виды ОЗЗ:  $K1$  – внутреннее;  $K2$  – в нейтрали защищаемого генератора;  $K3$  – внешнее

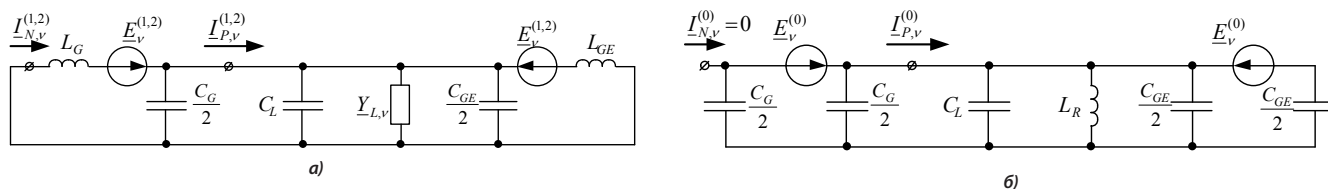


Рис. 5. Схема замещения электрической сети: а) прямой и обратной последовательностей; б) нулевой последовательности

противлениями их поперечных ветвей, и потому их влияние на токи замыкания на землю несущественно. Однако соотношение между сопротивлениями продольных ветвей оказывает влияние на распределение токов между двумя генераторами и учитывается при расчетах коэффициентом распределения

$$k_D = \frac{L_G}{L_E}$$

где \$L\_G\$ и \$L\_E\$ – индуктивности защищаемого и эквивалентного генераторов.

Внешняя сеть, примыкающая к сборным шинам, представлена эквивалентной Г-образной схемой с комплексной проводимостью продольной ветви

$$\underline{Y}_{B,v} = \frac{1}{R_B + j\nu\omega_1 L_B}$$

и емкостной проводимостью относительно земли

$$\underline{Y}_{C_b,v} = j\nu\omega_1 C_B$$

Удобно все емкостные проводимости эквивалентной схемы электрической сети выразить через поперечную проводимость фазы защищаемого генератора на основной гармонике

$$\underline{Y}_G = j\omega_1 C_G \tag{8}$$

Тогда проводимости генераторов для \$v\$-й гармоники и проводимость внешней сети относительно земли

$$\underline{Y}_{C_b,v} = \nu \underline{Y}_G k_B,$$

где

$$k_E = \frac{C_E}{C_G} \tag{9}$$

коэффициент, учитывающий различие емкостных проводимостей генераторов,

$$k_B = \frac{C_B}{C_G} \tag{10}$$

коэффициент различия емкостных проводимостей поперечных ветвей нагруз-

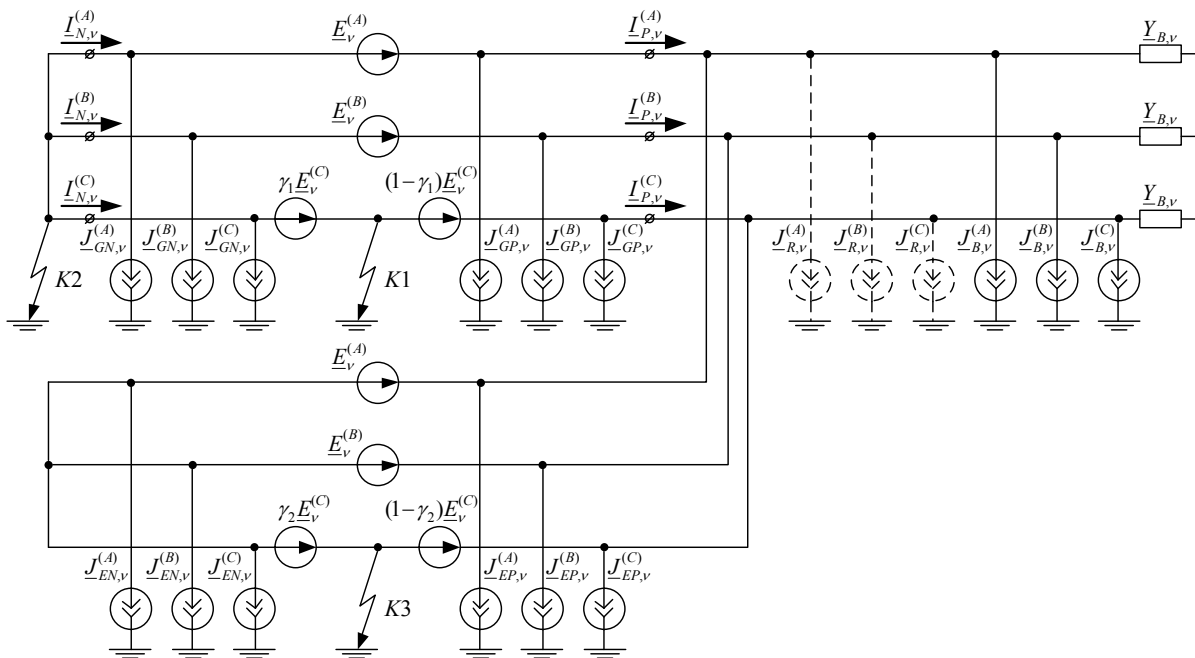


Рис. 6. Расчетная схема сети. Обозначения мест ОЗЗ даны на рис. 4



ки и защищаемого генератора. Суммарная емкостная проводимость всей сети на основной гармонике может быть выражена через проводимость защищаемого генератора

$$\underline{Y}_{\Sigma} = \underline{Y}_G (1 + k_E + k_B). \quad (11)$$

Тогда суммарная емкостная проводимость сети на  $\nu$ -й гармонике

$$\underline{Y}_{\Sigma, \nu} = \nu \underline{Y}_{\Sigma}. \quad (12)$$

Режим нейтрали сети в схеме учтен с помощью эквивалентной индуктивной проводимости дугогасящего реактора на  $\nu$ -й гармонике

$$\underline{Y}_{R, \nu} = -j \frac{3}{\nu \omega_1 L_R},$$

которая связана с суммарной емкостной проводимостью (11) и коэффициентом компенсации емкостных токов на основной гармонике

$$k_R = \frac{Y_R}{Y_{\Sigma}}$$

следующим образом:

$$\underline{Y}_{R, \nu} = -\frac{k_R}{\nu} \underline{Y}_{\Sigma}.$$

Теоретически в сетях с компенсированной нейтралью величина индуктивной проводимости дугогасящего реактора на частоте основной гармоники ( $\nu=1$ ) должна быть равна суммарной емкостной проводимости всей сети [7], поэтому  $k_R = 1$ . Однако в реальности всегда присутствует расстройка компенсации и  $k_R \neq 1$ . В сетях с изолированной нейтралью  $\underline{Y}_{R, \nu} = 0$  и  $k_R = 0$ .

Влияние нейтралеобразующих трансформаторов  $TN1$  и  $TN2$  (рис. 3), с помощью которых подключаются дугогасящие реакторы к сети, не существенно и в расчетах не учитывается.

Полагаем, что система полностью симметрична и все элементы сети имеют линейную характеристику. Активные проводимости элемен-

тов сети относительно земли малы по сравнению с емкостными проводимостями [9], и поэтому в расчет не принимаются.

### Расчет токов нормального и аварийного режимов

Согласно (5)–(7) гармоники делятся на группы по последовательностям. Поскольку в нормальном режиме сеть симметрична, то источники каждой гармоники работают в схеме соответствующей последовательности (рис. 5). Например, ЭДС 3-й гармоники, относящаяся к нулевой последовательности, работает только в схеме нулевой последовательности (рис. 5, б), а ЭДС 5-й гармоники, относящаяся к обратной последовательности, – только в схеме обратной последовательности (рис. 5, а).

Выражения для токов генератора со стороны нейтрали и дифференциальных токов в нормальном режиме приведены в таблице П1 Приложения.

В схеме аварийного режима рассмотрены ОЗЗ в трех точках сети (рис. 4): внутреннее  $K1$  в защищаемом генераторе, электрически удаленное на относительное расстояние  $\gamma_1$  от его нейтральных выводов;  $K2$  в нейтрали защищаемого генератора; внешнее  $K3$  в эквивалентном генераторе, электрически удаленное на относительное расстояние  $\gamma_2$  от его нейтральных выводов.

Аварийный режим вносит в сеть несимметрию. Поэтому схему проще рассчитывать в фазных координатах, используя метод наложения. С этой целью все ветви с известными токами заменяются эквивалентными источниками тока (рис. 6) в соответствии с теоремой компенсации [8].

Выражения токов источников тока, токов со стороны нейтральных выводов генератора и дифференциальных токов для режимов внутреннего ОЗЗ, ОЗЗ в нейтрали защищаемого генератора и внешнего ОЗЗ приведены в Приложении.

### Выводы

Несинусоидальность формы кривой ЭДС генератора приводит к появле-

нию высших гармоник и в токе.

Величина и распределение тока зависят от параметров электрической сети и места замыкания. Использование дифференциального тока высших гармоник обеспечивает селективность защиты от ОЗЗ генераторов укрупненного блока и в сетях с гальванической связью между генератором и потребителем. Таким образом, высшие гармоники, порождаемые синхронным генератором, представляют собой широкий информационный базис для релейной защиты генератора от замыканий его обмотки на землю.

Релейная защита не способна распознать различие в природе возникновения высших гармоник. В то же время, как показывает анализ токов замыканий на землю, источники высших гармоник, расположенные вне генераторной сети, благоприятствуют повышению чувствительности защиты и не влияют на ее селективность. Очевидно, что релейная защита, обеспечивающая правильную работу в схеме, когда источник высших гармоник локализован в генераторной сети, сохранит свои функциональные возможности и в схемах, когда в генераторную сеть инжектируются высшие гармоники из прилегающей сети. Отсюда следует, что с точки зрения чувствительности защит случай, когда генератор является единственным источником высших гармоник, является расчетным.

### Приложение

Приняты следующие обозначения:

$\underline{E}_\nu^{(x)}$  – ЭДС  $\nu$ -й гармоники;

$\underline{I}_{\Sigma, \nu}^{(x)}$  – ток  $\nu$ -й гармоники (ток эквивалентного источника) ветви с схемы замещения сети;

$\underline{I}_{N, \nu}^{(x)}$  – ток  $\nu$ -й гармоники защищаемого генератора со стороны нейтрали;

$\underline{I}_{\Delta, \nu}^{(x)}$  – дифференциальный ток  $\nu$ -й гармоники защищаемого генератора.

$\mathcal{X}$  может принимать несколько значений:  $\sigma = A, B, C$  – обозначение фазы;

$f = A, B, C$  – обозначение поврежденной фазы,  $f \neq \sigma$ ;

$\theta = 1, 2, 0$  – обозначение последовательностей симметричных составляющих.  
 $s$  – обозначение ветви схемы замещения сети, может принимать несколько значений:  
 $GN, GP$  – обозначение ветви с поперечной емкостной проводимостью защищаемого генератора со стороны нейтрали и фазных выводов;  
 $EN, EP$  – обозначение ветви с поперечной емкостной проводимостью эквивалентного генератора со стороны нейтрали и фазных выводов;  
 $B$  – обозначение ветви с поперечной емкостной проводимостью внешней сети;  
 $R$  – обозначение ветви с поперечной индуктивной проводимостью дугагающего реактора.

Например,  $\underline{E}_3^{(A)}$  – ЭДС 3-й гармоники фазы  $A$  генератора,  $\underline{J}_{-EN,5}^{(B)}$  – эквивалентный источник тока 5-й гармоники в ветви с емкостной проводимостью фазы  $B$  эквивалентного генератора со стороны нейтрали,  $I_{N,9}^{(1)}$  – ток прямой последовательности 9-й гармоники со стороны нейтрали защищаемого генератора.

$\underline{\lambda}$  – комплексный оператор поворота. Если  $f = A$ , то  $\underline{\lambda} = 1$ ; если  $f = B$ , то  $\underline{\lambda} = e^{j120^\circ}$  и  $\underline{\lambda} = e^{j240^\circ}$  для  $\underline{I}_v^{(1)}$  и  $\underline{I}_v^{(2)}$  соответственно; если  $f = C$ , то  $\underline{\lambda} = e^{j240^\circ}$  и  $\underline{\lambda} = e^{j120^\circ}$  для  $\underline{I}_v^{(1)}$  и  $\underline{I}_v^{(2)}$  соответственно.

**Нормальный режим**

Токи нормального режима приведены в табл. П1.

**Внутреннее ОЗЗ**

Токи источников тока схемы на рис. 6 в режиме внутреннего ОЗЗ ( $K1$ ):

$$\underline{J}_{GN,v}^{(\sigma)} = -\gamma_1 \underline{E}_v^{(f)} \frac{v \underline{Y}_G}{2};$$

$$\underline{J}_{GN,v}^{(f)} = -\gamma_1^2 \underline{E}_v^{(f)} v \underline{Y}_G;$$

$$\underline{J}_{GP,v}^{(\sigma)} = (\underline{E}_v^{(\sigma)} - \gamma_1 \underline{E}_v^{(f)}) \frac{v \underline{Y}_G}{2};$$

$$\underline{J}_{GP,v}^{(f)} = (1 - \gamma_1)^2 \underline{E}_v^{(f)} v \underline{Y}_G;$$

$$\underline{J}_{EN,v}^{(\sigma,f)} = -\gamma_1 \underline{E}_v^{(f)} \frac{v \underline{Y}_G k_E}{2};$$

$$\underline{J}_{s,v}^{(\sigma,f)} = (\underline{E}_v^{(\sigma)} - \gamma_1 \underline{E}_v^{(f)}) v \underline{Y}_s,$$

$$s = EP, B; \underline{Y}_{EP} = \frac{Y_G k_E}{2};$$

$$\underline{Y}_B = \underline{Y}_G k_B;$$

$$\underline{J}_{R,v}^{(\sigma,f)} = (\underline{E}_v^{(0)} - \gamma_1 \underline{E}_v^{(f)}) \underline{Y}_{R,v} = -(\underline{E}_v^{(0)} - \gamma_1 \underline{E}_v^{(f)}) \frac{k_R}{v} \underline{Y}_\Sigma.$$

Токи со стороны нейтральных выводов и дифференциальные токи приведены в табл. П2.

**ОЗЗ в нейтрали защищаемого генератора**

Токи источников тока схемы на рис. 6 в режиме ОЗЗ в нейтрали защищаемого генератора ( $K2$ ):

$$\underline{J}_{-s,v}^{(\sigma)} = 0, s = GN, EN;$$

$$\underline{J}_{-s,v}^{(\sigma)} = \underline{E}_v^{(\sigma)} v \underline{Y}_s, s = GP, EP, B;$$

$$\underline{Y}_{GP} = \frac{Y_G}{2}; \underline{Y}_{EP} = \frac{Y_G k_E}{2}; \underline{Y}_B = \underline{Y}_G k_B;$$

$$\underline{J}_{R,v}^{(\sigma)} = \underline{E}_v^{(0)} \underline{Y}_{R,v} = \underline{E}_v^{(0)} \frac{k_R}{v} \underline{Y}_\Sigma.$$

Токи со стороны нейтральных выводов и дифференциальные токи приведены в табл. П3.

**Внешнее ОЗЗ**

Токи источников тока схемы на рис. 6 в режиме внешнего ОЗЗ ( $K3$ ):

$$\underline{J}_{GN,v}^{(\sigma,f)} = -\gamma_2 \underline{E}_v^{(f)} \frac{v \underline{Y}_G}{2};$$

$$\underline{J}_{NE,v}^{(f)} = -\gamma_2^2 \underline{E}_v^{(f)} v \underline{Y}_G k_E;$$

$$\underline{J}_{PE,v}^{(\sigma)} = (\underline{E}_v^{(\sigma)} - \gamma_2 \underline{E}_v^{(f)}) \frac{v \underline{Y}_G k_E}{2};$$

$$\underline{J}_{PE,v}^{(f)} = (1 - \gamma_2)^2 \underline{E}_v^{(f)} v \underline{Y}_G k_E;$$

$$\underline{J}_{-s,v}^{(\sigma,f)} = (\underline{E}_v^{(\sigma)} - \gamma_2 \underline{E}_v^{(f)}) v \underline{Y}_s,$$

$$s = GP, B; \underline{Y}_{GP} = \frac{Y_G}{2};$$

$$\underline{Y}_B = \underline{Y}_G k_B;$$

$$\underline{J}_{R,v}^{(\sigma,f)} = (\underline{E}_v^{(0)} - \gamma_2 \underline{E}_v^{(f)}) \underline{Y}_{R,v} = (\underline{E}_v^{(0)} - \gamma_2 \underline{E}_v^{(f)}) \frac{k_R}{v} \underline{Y}_\Sigma.$$

Токи со стороны нейтральных выводов и дифференциальные токи приведены в табл. П4.

Табл. П1. Токи нормального режима

$\chi$	Токи в нейтральных выводах $\underline{I}_{N,v}^{(\chi)}$	Дифференциальный ток $\underline{I}_{\Delta,v}^{(\chi)}$
$1, 2$	$\underline{E}_v^{(1,2)} \left[ v \underline{Y}_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + \underline{Y}_{B,v} \right] \frac{1}{1 + k_D}$	$-\underline{E}_v^{(1,2)} \frac{v \underline{Y}_G}{2}$
$0$	0	$\underline{E}_v^{(0)} \frac{v \underline{Y}_G}{2} \left[ 1 - \frac{Y_G (1 + k_E)}{Y_\Sigma \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right)} \right]$
$\sigma$	$(\underline{E}_v^{(\sigma)} - \underline{E}_v^{(0)}) \left[ v \underline{Y}_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + \underline{Y}_{B,v} \right] \frac{1}{1 + k_D}$	$-(\underline{E}_v^{(\sigma)} - \underline{E}_v^{(0)}) \frac{v \underline{Y}_G}{2} + \underline{I}_{\Delta,v}^{(0)}$

Табл. П2. Токи при внутреннем ОЗЗ (К1)

$\chi$	Токи в нейтральных выводах $I_{N,v}^{(\chi)}$	Дифференциальный ток $I_{\Delta,v}^{(\chi)}$
$I, 2$	$\left[ -\lambda \left( E_v^{(0)} - \gamma_1 E_v^{(f)} \right) v Y_{\Sigma} \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right) + \lambda E_v^{(0)} v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} \right) \right] \frac{1 + k_D - \gamma_1 k_D}{1 + k_D} + E_v^{(1,2)} \left[ v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + Y_{B,v} \right] \frac{1}{1 + k_D} - \frac{\lambda E_v^{(f)} v Y_G k_D (1 - 2\gamma_1)^2}{2 \cdot 3(1 + k_D)}$	$\lambda \left( E_v^{(0)} - \gamma_1 E_v^{(f)} \right) v Y_{\Sigma} \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right) - \lambda E_v^{(0)} v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} \right) - \frac{E_v^{(1,2)} v Y_G}{2}$
$0$	$0$	$\left( E_v^{(0)} - \gamma_1 E_v^{(f)} \right) v Y_{\Sigma} \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right) - E_v^{(0)} v Y_G \left( 1 + \frac{k_E}{2} \right) + \gamma_1 E_v^{(f)} v Y_G$
$\sigma$	$\left[ \left( E_v^{(0)} - \gamma_1 E_v^{(f)} \right) v Y_{\Sigma} \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right) - E_v^{(0)} v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} \right) \right] \frac{1 + k_D - \gamma_1 k_D}{1 + k_D} + \left( E_v^{(\sigma)} - E_v^{(0)} \right) \left[ v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + Y_{B,v} \right] \frac{1}{1 + k_D} + \frac{E_v^{(f)} v Y_G k_D (1 - 2\gamma_1)^2}{2 \cdot 3(1 + k_D)}$	$- \left( E_v^{(\sigma)} - 2\gamma_1 E_v^{(f)} \right) \frac{v Y_G}{2}$
$f$	$\left[ - \left( E_v^{(0)} - \gamma_1 E_v^{(f)} \right) v Y_{\Sigma} \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right) + E_v^{(0)} v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} \right) \right] \frac{2(1 + k_D - \gamma_1 k_D)}{1 + k_D} + \left( E_v^{(f)} - E_v^{(0)} \right) \left[ v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + Y_{B,v} \right] \frac{1}{1 + k_D} - \frac{E_v^{(f)} v Y_G k_D (1 - 2\gamma_1)^2}{2 \cdot 3(1 + k_D)}$	$3 \left( E_v^{(0)} - \gamma_1 E_v^{(f)} \right) v Y_{\Sigma} \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right) - 3 E_v^{(0)} v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} \right) - E_v^{(f)} \frac{v Y_G}{2} (1 - 2\gamma_1)$

Табл. П3. Токи при ОЗЗ в нейтрали защищаемого генератора (К2)

$\chi$	Токи в нейтральных выводах $I_{N,v}^{(\chi)}$	Дифференциальный ток $I_{\Delta,v}^{(\chi)}$
$I, 2$	$E_v^{(1,2)} \left[ v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + Y_{B,v} \right] \frac{1}{1 + k_D}$	$- \frac{E_v^{(1,2)} v Y_G}{2}$
$0$	$E_v^{(0)} \left[ v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) - v Y_{\Sigma} \frac{k_R}{v^2} \right]$	$- \frac{E_v^{(0)} v Y_G}{2}$
$\sigma$	$\left( E_v^{(\sigma)} - E_v^{(0)} \right) \left( v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + Y_{B,v} \right) \frac{1}{1 + k_D} + E_v^{(0)} \left[ v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) - v Y_{\Sigma} \frac{k_R}{v^2} \right]$	$- \frac{E_v^{(\sigma)} v Y_G}{2}$

Табл. П4. Токи при внешнем ОЗЗ (К3)

$\chi$	Токи в нейтральных выводах $I_{N,v}^{(\chi)}$	Дифференциальный ток $I_{\Delta,v}^{(\chi)}$
$I, 2$	$\lambda \left[ E_v^{(0)} v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} \right) - \left( E_v^{(0)} - \gamma_2 E_v^{(f)} \right) v Y_{\Sigma} \left( 1 - \frac{k_R}{v^2} \right) \right] \frac{\gamma_2}{1 + k_D} + E_v^{(1,2)} \left[ v Y_G \left( \frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B \right) + Y_{B,v} \right] \frac{1}{1 + k_D} + \frac{\lambda E_v^{(f)} v Y_G k_E (1 - 2\gamma_2)^2}{2 \cdot 3(1 + k_D)}$	$- \frac{E_v^{(1,2)} v Y_G}{2}$
$0$	$0$	$- \left( E_v^{(0)} - 2\gamma_2 E_v^{(f)} \right) \frac{v Y_G}{2}$



Табл. П4. Токи при внешнем ОЗЗ (КЗ)

$\chi$	Токи в нейтральных выводах $\underline{I}_{N,\nu}^{(\chi)}$	Дифференциальный ток $\underline{I}_{\Delta,\nu}^{(\chi)}$
0	0	$-\left(E_{\nu}^{(0)} - 2\gamma_2 E_{\nu}^{(f)}\right) \frac{\nu Y_G}{2}$
$\sigma$	$\left[\left(E_{\nu}^{(0)} - \gamma_2 E_{\nu}^{(f)}\right) \nu Y_{\Sigma} \left(1 - \frac{k_R}{\nu^2}\right) - E_{\nu}^{(0)} \nu Y_G \left(\frac{1}{2} + \frac{k_E}{2}\right)\right] \frac{\gamma_2}{1 + k_D} + \left(E_{\nu}^{(\sigma)} - E_{\nu}^{(0)}\right) \left[\nu Y_G \left(\frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B\right) + Y_{B,\nu}\right] \frac{1}{1 + k_D} - E_{\nu}^{(f)} \nu Y_G \frac{k_E (1 - 2\gamma_2)^2}{2 \cdot 3(1 + k_D)}$	$-\left(E_{\nu}^{(\sigma)} - 2\gamma_2 E_{\nu}^{(f)}\right) \frac{\nu Y_G}{2}$
f	$\left[E_{\nu}^{(0)} \nu Y_G \left(\frac{1}{2} + \frac{k_E}{2}\right) - \left(E_{\nu}^{(0)} - \gamma_2 E_{\nu}^{(f)}\right) \nu Y_{\Sigma} \left(1 - \frac{k_R}{\nu^2}\right)\right] \frac{2\gamma_2}{1 + k_D} + \left(E_{\nu}^{(f)} - E_{\nu}^{(0)}\right) \left[\nu Y_G \left(\frac{1}{2} + \frac{k_E}{2} + k_B\right) + Y_{B,\nu}\right] \frac{1}{1 + k_D} + E_{\nu}^{(f)} \nu Y_G \frac{k_E 2(1 - 2\gamma_2)^2}{2 \cdot 3(1 + k_D)}$	$-\left(E_{\nu}^{(f)} - 2\gamma_2 E_{\nu}^{(f)}\right) \frac{\nu Y_G}{2}$

**Литература:**

1. Копылов И.Г., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.Г. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с. – (Основы наук).
2. Солдатов А.В., Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г. Высшие гармоники тока синхронного генератора как информационные сигналы релейной защиты. // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 380-385.
3. Кискачи В.М., Кискачи В.В., Иванова Т.А. Селективная защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, работающих на сборные шины. // В сб. ВНИИЭ: Релейная защита и автоматика ВЛ сверхвысоких напряжений и мощных генераторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 63-71.
4. Алексеев В.Г. Токовая защита нулевой последовательности типа ЗНП от однофазных и двойных замыканий на землю обмоток статора генераторов. // Вестник ВНИИЭ-98. Релейная защита и автоматика. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – С. 133-139.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. Солдатов А.В., Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г., Сандомиров А.Ю. Токи высших гармоник в генераторной сети при однофазных замыканиях на землю / Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 375-379.
7. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. – 152 с: ил.
8. Теоретические основы электротехники. Т1. Основы теории линейных цепей: учебник для электротехн. вузов / под ред. П.А. Ионкина. – изд. 2-е, переработ. и доп. М.: «Высш. школа», 1976. – 544 с.
9. Кискачи В.М. Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью // Труды ВНИИЭ, 1966. – Вып. 26. – С. 89-105.
10. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2008. – 704 с.
11. Шулин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с: ил. [Библиотечка электротехника; Вып. 11 (35)].

www.intecheco.ru

## Седьмая Межотраслевая конференция АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА-2016

**29 ноября 2016 г., г. Москва**

29 ноября 2016 г. в ГК «ИЗМАЙЛОВО» (г. Москва) состоится Седьмая Межотраслевая конференция «АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА-2016», посвященная демонстрации новейших разработок для автоматизации предприятий машиностроения, энергетики, металлургии, нефтегазовой и цементной промышленности, современных информационных технологий, ИТ, АСУТП, ERP, MES-систем, контрольно-измерительной техники, газоанализаторов, расходомеров, датчиков, АСУ технологических процессов.